



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

DESIGN KAROSERIE PNEUMOBILU PRO ROBOTICKOU VÝROBU

PNEUMOBILE CAR-BODY DESIGN FOR ROBOTIC FABRICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Vevera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Škaroupka, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Vevera**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Průmyslový design ve strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. David Škaroupka, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Design karoserie pneumobilu pro robotickou výrobu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tradiční výroba laminovaných karoserií je drahá, časově náročná a produkuje velké množství odpadního materiálu. Pro kusovou výrobu má značný potenciál robotická výroba, tzn. využití univerzálního potenciálu 6-osého průmyslového robota. Nekonvenční výrobní proces jednoúčelově připravený pro navržený design sníží výrobní náklady a může vést k progresivnímu stylistickému řešení.

Typ práce: vývojová - designérská

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Navrhnout karoserii na reálný podvozek pneumobilu závodního týmu Pneumobil Racing Team Brno. Jedná se o aplikovaný design, kusovou výrobu s použitím plastů nebo kompozitů. Cílovou skupinou jsou studenti.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikace uživatelských a funkčních potřeb karoserie,
- analýza možností robotické výroby karoserie bez nutnosti celoplošné formy,
- návrh metodiky designu karoserie pro robotickou výrobu,
- výroba modelu karoserie pneumobilu,
- srovnání výhod a nevýhod laminovaných karoserií pneumobilu s navrženým řešením.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, sumarizační poster, technický poster, ergonomický poster, designérský poster, fotografie modelu, fyzický model.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

BOHNACKER, Hartmut, Benedikt GROSS, Julia LAUB a Claudius. LAZZERONI. Generative design: visualize, program, and create with processing. _ . New York: Princeton Architectural Press, c2012. ISBN 9781616890773.

MORRIS, Richard. The fundamentals of product design. Lausanne: AVA, c2009. ISBN 978-2-940373-17-8.

LIDWELL, William. a Gerry. MANACSA. Deconstructing product design: exploring the form, function, usability, sustainability, and commercial success of 100 amazing products. Beverly, Mass.: Rockport Publishers, c2009. ISBN 15-925-3345-0.

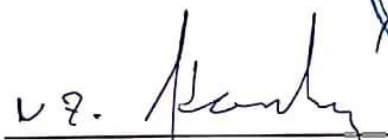
LIDWELL, William, Kritina HOLDEN a Jill BUTLER. Univerzální principy designu: 125 způsobů jak zvýšit použitelnost a přitažlivost a ovlivnit vnímání designu. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-3540-2.

CHRISTOPH GENGNAGEL..[ET AL.] (EDS.). Computational design modelling proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2234-354.

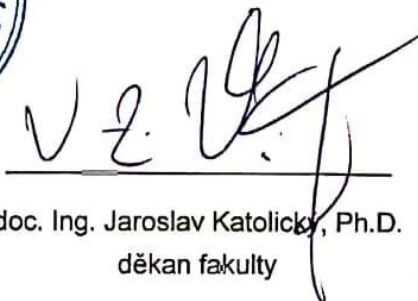
TEDESCHI, Arturo. AAD_Algorithms-aided design: parametric strategies using grasshopper. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014. ISBN 978-88-95315-30-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 8. 11. 2018



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce řeší design karoserie pneumobilu určené pro robotickou výrobu metodou zakřiveného ohýbání. Jsou vyhodnoceny možnosti této technologie a problematika specifického chování CCF geometrií. Za účelem zjednodušení a urychlení návrhového procesu je předložen návrh softwarového nástroje určeného k simulaci CCF geometrií. Získané poznatky jsou využity k vytvoření prototypu navrženého řešení pomocí zakřiveného ohýbání.

KLÍČOVÁ SLOVA

design, pneumobil, průmyslový robot, zakřivené ohýbání, robotické ohýbání, karoserie

ABSTRACT

This thesis solves design of the pneumobile bodywork designated for robotic manufacturing using curved folding method. The thesis evaluates possibilities of this technology and issue of specific behaviour of CCF geometries. With intention to simplify and speedup the proces of designing, the suggestion of software tool for CCF geometry simulation is proposed. Obtained pieces of knowledge are being used in creating the prototype of designed solution using curved folding.

KEYWORDS

Design, pneumobile, industrial robot, curved crease folding, robotic folding, bodywork

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VEVERA, Tomáš. *Design karoserie pneumobilu pro robotickou výrobu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117682>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Škaroupka.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Škaroupkovi Ph.D. za vedení práce a věcné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům brněnské pobočky společnosti Evektor s. r. o., kteří mi během stáže poskytli spoustu cenných rad. Také děkuji svým spolužákům a blízkým přátelům za psychickou podporu během studia. Největší díky však patří mé rodině za podporu a trpělivost nejen během mého studentského života.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Škaroupky Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Technická analýza	14
2.1.1	Pneumobil	14
2.1.2	Současná výroba karoserie pneumobilu	16
2.1.3	Metody výroby CCF geometrií	17
2.1.4	Materiály	19
2.2	Designérská analýza	21
2.2.1	Zakřivené ohýbání v produktovém designu	22
2.2.2	Zakřivené ohýbání v designu karoserií	24
2.2.3	Design karoserií současných pneumobilů	26
2.3	Curved-Crease Folding	29
2.3.1	Metody popisu CCF geometrií	31
2.3.2	Softwarové nástroje	34
2.3.3	Metody pro tvorbu CCF geometrií	36
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	39
3.1	Analýza problému	39
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	39
3.3	Podstata a cíle diplomové práce	40
4	VARIANTNÍ STUDIE DESIGNU	41
4.1	Použité metody designu	41
4.1.1	Návrhový proces	41
4.2	Variantní návrhy	43
4.2.1	Varianta 1	43
4.2.2	Varianta 2	45
4.2.3	Varianta 3	47
5	TVAROVÉ ŘEŠENÍ	48
5.1	Tvar a kompozice	48
5.2	Díly tvořené CCF geometrií	50
5.3	Díly pro konvenční způsob výroby	51

5.4	Úpravy konstrukce pneumobilu	53
6	KONSTRUKČNĚ TECHNOLOGICKÉ A ERGONOMICKÉ ŘEŠENÍ	54
6.1	Konstrukčně technologické řešení	54
6.1.1	Simulace zakřivených ohybů	54
6.1.2	Robotická výroba	58
6.1.3	Materiály	62
6.1.4	Uchycení karoserie	62
6.1.5	Rozměry	65
6.2	Ergonomické řešení	65
7	BAREVNÉ A GRAFICKÉ ŘEŠENÍ	67
7.1	Barevné řešení	67
7.2	Grafické řešení	69
8	DISKUZE	70
8.1	Psychologické aspekty	70
8.2	Ekonomické aspekty	70
8.3	Sociální funkce	70
8.3.1	Ekologie	71
8.4	Srovnání navrženého řešení se současnou metodou	71
9	ZÁVĚR	73
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	77
12	SEZNAM TABULEK	80
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	81
14	SEZNAM PŘÍLOH	82

1 ÚVOD

Rapidní rozvoj digitalizace, automatizace a kyberneticko-fyzikálních systémů, který v současné době můžeme pozorovat, přináší nové možnosti průmyslové výroby. Výhody těchto možností plynou například z využívání univerzálních robotických zařízení na úkor specializovaných nástrojů při obrábění či manipulaci s výrobky. Průmyslový robot může být využíván mnoha způsoby, přičemž účel jednoho robota je možné poměrně snadno změnit. Roboti mohou sloužit k 3D tisku, svařování, frézování a v neposlední řadě také k ohýbání plátových materiálů. Tímto se otevírají nové možnosti výroby a tvarování průmyslově vyráběných výrobků.

Robotické ohýbání plátových materiálů nabízí možnost výroby komplexních trojrozměrných objektů bez nutnosti formy, což má značný potenciál pro kusovou či malosériovou výrobu. Metoda může nejen přispět ke snížení nákladů, času výroby nebo znečištění životního prostředí, ale je také cestou k využití rozvinutelných ploch a zakřiveného ohýbání (Curved Crease Folding). Netradiční způsob tvarování produktů může v některých případech pozitivně ovlivnit estetickou stránku produktu. Ke studii a zmapování přínosů technologie výroby slouží v této práci pneumobil, projekt studentů VUT v Brně.

Pneumobil je závodní monopost poháněný stlačeným vzduchem, který je vyvíjen za účelem účasti v mezinárodní soutěži Aventics Pneumobile Competition konající se v maďarském Egeru. Studentský tým Pneumobil Racing Team Brno je pravidelným účastníkem této soutěže.

Tato diplomová práce se věnuje návrhu designu karoserie pneumobilu určeného k výrobě pomocí metody robotického ohýbání. Teoretická část práce shrnuje současné poznatky související s řešenou problematikou, stávající metody výroby a jejich výsledky. Na základě této rešerše je definován problém a konkrétní cíle práce. Zbytek práce obsahuje popis metod použitých k dosažení těchto cílů a srovnání metody robotického ohýbání s tradiční výrobní technologií.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Technická analýza

2.1.1 Pneumobil

Historie

Vozidla na stlačený vzduch začala vznikat v 80. letech 19. století, tedy zhruba ve stejném období, jako vozidla využívající spalovací motor. První využití našel tento typ pohonu v městské dopravě, později byl aplikován v důlních lokomotivách. Ve 30. letech 20. století však opadl zájem o pneumaticky poháněná vozidla zejména díky zdokonalení spalovacího motoru. Další vývoj byl zaznamenán až po roce 1970, kvůli tehdejší ropné krizi. Vzniklo několik patentů a vylepšení pneumatického motoru, stejně tak jako prototypů osobních vozidel na stlačený vzduch. Do sériové výroby se však tato vozidla nikdy nedostala. [1]

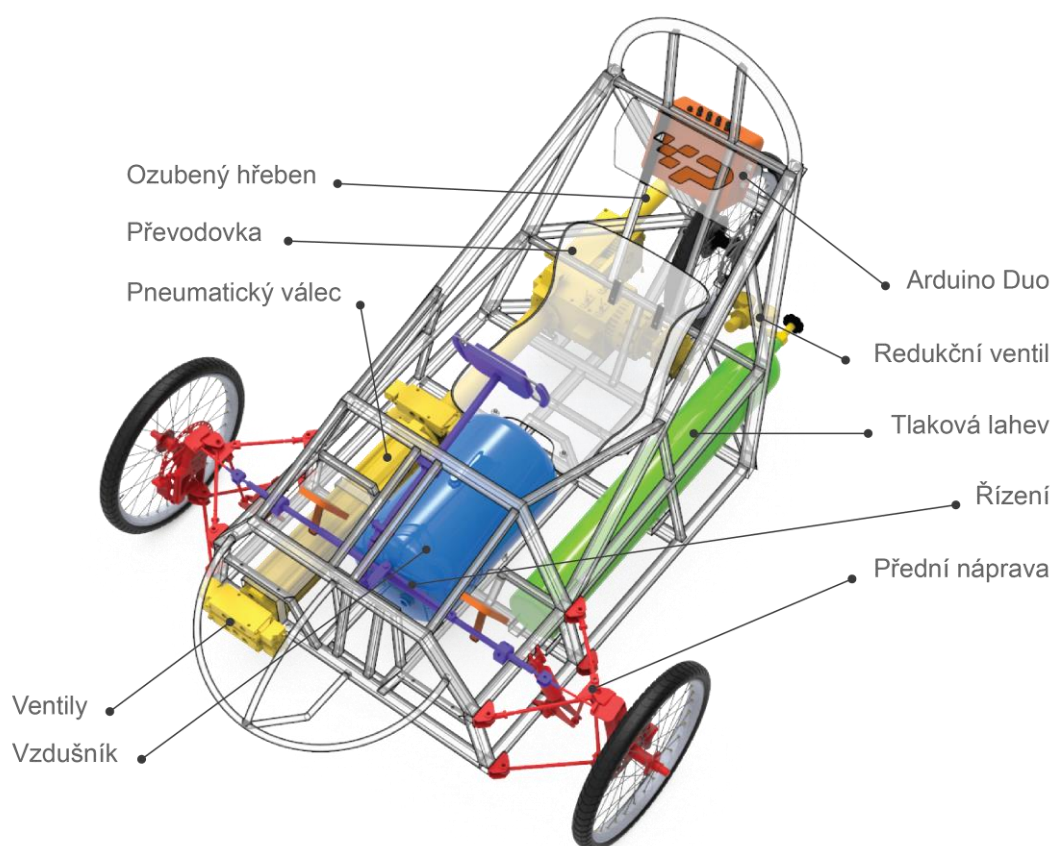
V roce 2008 proběhl první ročník soutěže Aventics Pneumobile Competition v maďarském Egeru. Byla založena firmou Aventics Hungary Kft. (tehdy Bosh Rexroth Kft. a Bosh Pneumatika Kft.) za účelem vytvořit příležitost pro budoucí inženýry nahlédnout do tajů pneumatiky a vyzkoušet si alternativní aplikace jejich produktů. V následujících letech se soutěž rozrostla a stala se mezinárodní. Díky tomu dochází k neustálému vylepšování technologie a překonávání rekordů. V roce 2011 vznikly první pneumobily na FSI VUT v Brně v rámci diplomových prací. Od následujícího roku (2012) se VUT soutěže pravidelně zúčastňuje. [1] [2] [3]



obr. 2-1 První pneumobily vytvořené studenty VUT [3]

Konstrukce pneumobilu

Jako nádrž slouží vysokotlaká lahev, která je naplněna vzduchem pod tlakem 200 barů. Vzduch se z lahve pouští skrz redukční ventil do pneumatického obvodu maximálním povoleným tlakem 10 barů. Ve vozidle jsou obsaženy dva pneumatické okruhy, které je možné přepínat podle potřebného způsobu jízdy. První okruh je konstruován speciálně pro disciplínu Long Distance, ve které se soutěží o nejdelší dojezd vozidla. Dojezd současných pneumobilů na jednu nádrž se pohybuje okolo 10 km. Okruh je připojen pouze k jednomu ventilu na každé straně pneumatického válce. Druhý okruh je určen pro disciplíny Arcade race a Sprint, kde je důležité dosáhnout vyšší rychlosti, a je zapojen do obou dvojic ventilů válce. Díky tomu je dosaženo vyššího průtoku vzduchu do válce. Otvírání a zavírání ventilů je ovládáno elektronicky prostřednictvím mikropočítače Arduino Duo. [31]



obr. 2-2 Schéma vnitřního uspořádání pneumobilu Javelin

Druhá tlaková láhev umístěná ve vozidle – vzdušník o objemu až 60 l – slouží jako zásobárna tlaku, který se v průběhu několika prvních cyklů po startu spotřebuje a poté je vzduch dodáván přímo z druhé nádrže. Nejvyšší povolený zdvih válce je 500 mm. Translační pohyb válce je převáděn na rotační prostřednictvím ozubeného hřebene. Hřeben pohání dvojici volnoběžek zapojených v opačných směrech tak, aby jedna zabírala a druhá prokluzovala. Vyvinutý výkon je přenášen na zadní kolo prostřednictvím řetězu či řemene. Přední náprava využívá nezávislého odpruženého zavěšení, díky kterému kola zůstávají v kontaktu s vozovkou i při přejezdu překážek a nerovností. Pneumobil je schopen vyvinout rychlost blížící se k 50 km/h, tato hranice se však s každým ročníkem soutěže posunuje. [3] [31]

2.1.2 Současná výroba karoserie pneumobilu

Výroba karoserií pro pneumobily týmu Pneumobil Racing Team Brno probíhá v současné době technologií laminování. Výsledná karoserie je vyrobena z vláknového kompozitu s využitím uhlíkových vláken. [3]

Proces výroby:

1. Nejprve se vyrobí forma z extrudovaného polystyrenu nebo umělého dřeva podle designérského návrhu vytvořeného v CAD softwaru (Rhinoceros).
2. Na formu se nanese separátor, který slouží jako mezivrstva mezi formou a samotnou karoserií. Jeho hlavní úlohou je, aby se laminát nepřilepil na formu.
3. Ruční kladení za mokra. Tkanina z uhlíkových vláken se prosycuje tekutou pryskyřicí pomocí štětce, stěrky nebo válečku.
4. Po zaschnutí vrstvy se proces opakuje, dokud není nanesen požadovaný počet vrstev.
5. Karoserie se ořeže a sejme z formy.
6. Následně probíhá povrchová úprava a montáž na konstrukci pneumobilu.

Výhodou laminovaných karoserií je bezesporu jejich lehkost a pevnost, vlastnosti, které zajišťuje využití kompozitu z uhlíkových vláken. Další z výhod je variabilita tvarování, kterou tato technologie téměř neomezuje, dovoluje zejména organické tvarování, ale i ostré hranové přechody. Nevýhodou laminování je vysoká časová náročnost, množství odpadních materiálů, které plyne z nutnosti formy, což je pro kusovou výrobu značně neefektivní.

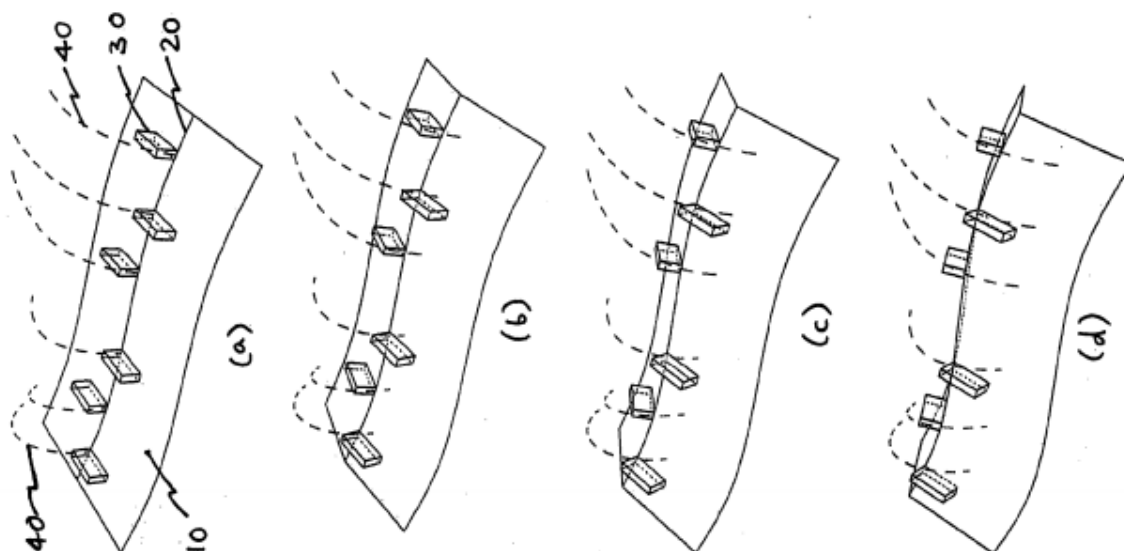


obr. 2-3 Výroba karoserie pneumobilu Airrari [8]

2.1.3 Metody výroby CCF geometrií

Ohýbání plátových materiálů pomocí připojovacích zařízení

Plátové materiály (sheet goods) jsou materiály, které mají mnohonásobně menší tloušťku, než je jejich délka a šířka, např. papír, plechy, plasty, textil, překližka apod. Tyto materiály se mohou chovat jako rozvinutelné plochy, jsou tedy vhodné pro zakřivené ohýbání. Produkce komplexních CCF tvarů z plátových materiálů může mít oproti konvenčním výrobním metodám jako je lisování značné výhody. Na rozdíl od lisování nebo laminování například zakřivené ohýbání nevyžaduje formu, která zvyšuje výrobní náklady a pro kusovou či malosériovou výrobu může být její zhotovení značně nevýhodné. Pro výše zmíněné metody je navíc třeba jednoúčelových výrobních nástrojů. Naproti tomu CCF geometrie může být zhotovena pomocí víceúčelových nástrojů či zařízení. [28]

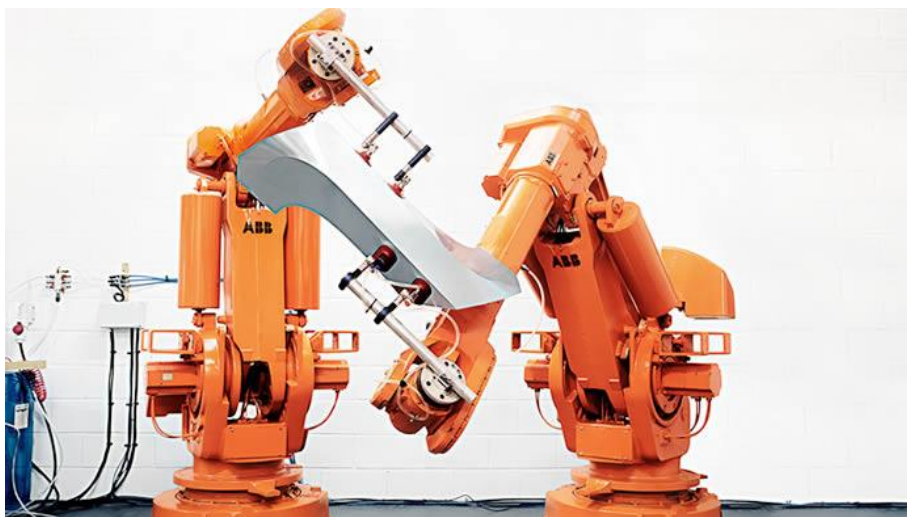


obr. 2-4 Možné uspořádání připojovacích zařízení při ohýbání podle křivky ve tvaru S. [28]

Připojovací zařízení jsou taková zařízení, která lze za účelem výroby připojit na libovolné místo plátového materiálu. Může jít o vakuové přísavky, elektromagnety či svorky. Ty se připojí na připravený kus plátového materiálu na obě plochy plátu (tedy z obou stran ohybové křivky) a jejich pohybem po předurčených trajektoriích vzniká požadovaný ohyb. Trajektorie jsou předurčeny pomocí simulace výpočtem, nebo metodou pokus-omyl. Pohyb zařízení musí být synchronizován, aby nedošlo k nechtěnému zprohýbání. Vzhledem k velkému množství proměnných, jako je pozice připojovacích zařízení, trajektorie, rychlost pohybu atd. lze dosáhnout určitého tvaru ohybu různými cestami. Obecně není nezbytné předpřipravit materiál narušením ohybové křivky (naříznutí, proděravění atp.) za účelem ovlivnění její pozice. Připojovací zařízení mohou být vedena ručně nebo pomocí robotického ramene. [28]

Ohýbání pomocí průmyslových robotů

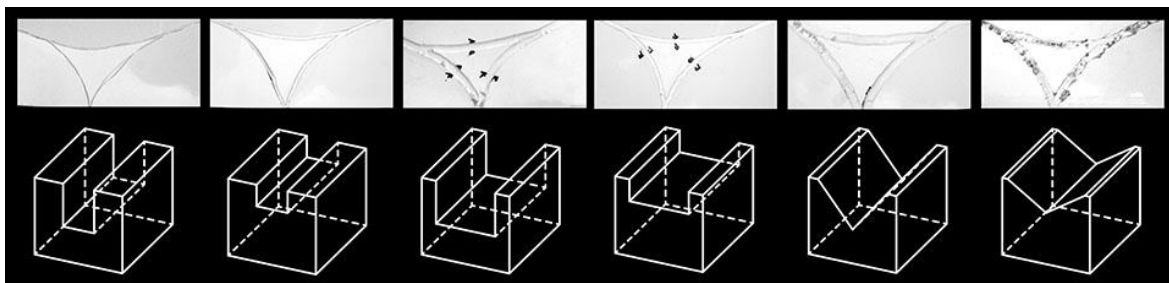
Produkce tvarů vytvořených pomocí CCF může být zprostředkována 6-osými průmyslovými roboty. Tuto technologii rozvíjí britská firma RoboFold od roku 2008. Digitální plochy vytvořené pomocí 3D softwaru se nejprve v počítači rozvinou, čímž vznikne 2D šablona. Tato šablona je podkladem pro vytvoření dat pro CNC frézku, která tvar vyřeže z požadovaného materiálu a také naruší ohybové linie. Následně je tento připravený kus materiálu umístěn pod průmyslového robota, který ho uchopí vakuovou přísavkou či přísavkami a ve spolupráci s druhým robotem materiál ohýbá do požadovaného tvaru (viz obr. 2-5). Tento proces materiál nenapíná tak jako např. lisování. Díky tomu mohou být například otvory vyvrtány předem, což urychluje výrobu a snižuje náklady. [14][17]



obr. 2-5 Ohýbání hliníkového plechu pomocí průmyslových robotů [14]

Způsoby narušení ohybové linie

Americký designer Henry David Louth provedl průzkum výroby CCF geometrií z plastových materiálů. Jedním z předmětů jeho zájmu byl vliv způsobu vytvoření a tvaru rýhy v křivce ohybu. Použitým materiálem byl 3mm polypropylen, do kterého byly vyfrézovány různě hluboké a široké „V“ a „U“ rýhy. Bylo zjištěno, že při použití frézky s nižší rychlostí se materiál více zahřívá, což zapříčiňuje nekonzistentní hloubku drážky. Protínají-li se rýhy nebo protínají-li obvodovou hranu, materiál se při ohybu hroutí. Tento nepříznivý efekt vyřešilo ukončení rýhy několik mm před průsečíkem či hranou. [19]



obr. 2-6 Vliv různých tvarů rýh na ohybovou linii [19]

2.1.4 Materiály

Zvolená technologie a požadavky pro aplikaci výsledného produktu si žádají pečlivě vybrat materiál pro výrobu. V úvahu přicházejí plasty, kompozity, textilie či kovy. Firma RoboFold pro realizaci prototypů využívá výhradně hliníkový plech, který je pro ohýbání vhodný.

Hliníkový plech

Hliník je lehký kov, má velmi široké využití např. v elektrotechnice a ve formě slitin v leteckém a automobilovém průmyslu. Disponuje dostatečnou pevností při velmi dobré tvárnosti. Plechy se vyrábí z čistého hliníku či z různých hliníkových slitin. Mechanické vlastnosti jednotlivých slitin se samozřejmě liší, viz tab. 2-1, kde jsou shrnuty nejběžnější hliníkové slitiny pro výrobu plechů od 0,5 mm tloušťky. Pro výrobu karoserie robotickou výrobou se jedná o téměř ideální materiál, jak je popsáno výše. [20][30]

EN AW	Chemické složení	Stav materiálu	Pevnost v tahu MPa	Mez kluzu MPa	Objemová hmotnost g/cm ³
1050A	Al99,5	H24	100 - 140	60	2,70
5083	AlMg4,5Mn	O/H111	275 - 350	125	2,66
5754	AlMg3	H14	240 - 280	190	2,67

tab. 2-1 Vlastnosti vybraných hliníkových slitin [30]

PETG

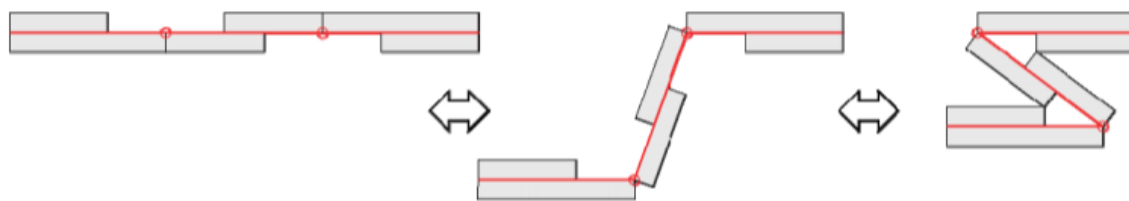
Jedná se o amorfni kopolyester, složením je velmi podobný jako materiál pro výrobu plastových lahví PET. Je vysoce rázově houževnatý, špatně hořlavý a má dobré optické vlastnosti. Materiál je vhodný pro potisk a k tvarování ohýbáním. Desky jsou dostupné v tloušťce od 0,6 mm. [21]

Polypropylen

Dlouhodobě tepelně stabilní materiál, vyznačuje se vysokou pevností při dlouhodobém namáhání při teplotě do 90 °C, výborně tvarovatelný za tepla, je voděodolný a hydrofobní. Rázová tuhost klesá při teplotách blížících se 0 °C. Používá se v chemickém průmyslu, ve strojírenství, elektrotechnice, potravinářství a automobilovém průmyslu. Desky jsou dostupné v tloušťce od 2 mm do 20 mm. [22]

Kompozity

Pro CCF geometrie mají potenciál kompozitní materiály, které jsou složeny ze silnějšího plátového materiálu a tenkého materiálu, který tvoří „pant“. Dvě vrstvy silnějšího materiálu o konstantní tloušťce, které mezi sebou svírají další, „pantový“, který má ideálně nulovou tloušťku. Podstatou této myšlenky je vytvoření drážky v silnějším materiálu podél ohybové linie a následný ohyb podél této linie (viz obr. 2-7). Příkladem takového materiálu je Foldtex, který je složen z překližky a různých textilních materiálů. Vyznačuje se nízkou hmotností a kombinace různých složek umožňuje různé variace vzhledu tohoto materiálu. Je dostupný v tloušťkách od 1 do 6 mm. [24][29]



obr. 2-7 Možné složení kompozitního materiálu [24]



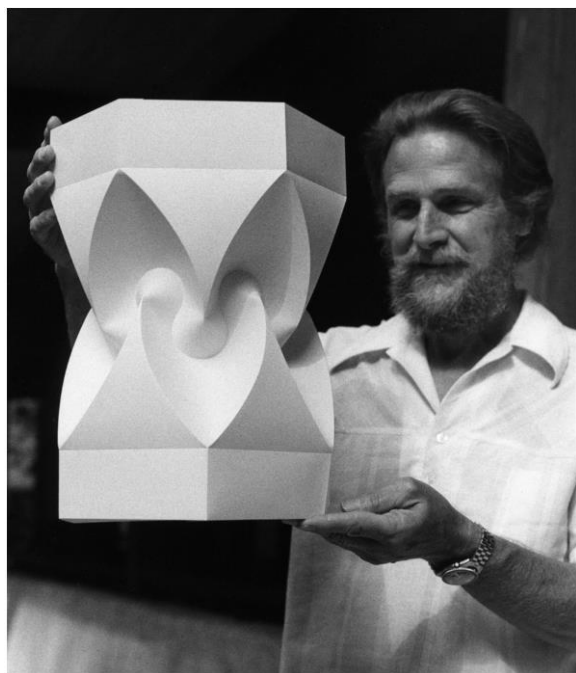
obr. 2-8 Materiál Foldtex [29]

2.2 Designérská analýza

Kapitola se věnuje současným produktům a konceptům souvisejícím s tématem. První část je věnována komerčně nabízeným produktům vytvořených pomocí CCF geometrií, druhá je zaměřena na činnost firmy RoboFold a koncepty karoserií automobilů určené pro robotickou výrobu. Třetí část obsahuje přehled vybraných vozů účastnících se posledních ročníků soutěže Aventics Pneumobile Competition.

2.2.1 Zakřivené ohýbání v produktovém designu

Počátky metody Curved Crease Folding (zakřivené ohýbání), která je pro robotickou výrobu karoserie stěžejní, je celkem problematické vystopovat. Vzešla z prizmatického ohýbání papíru a origami, které vešlo ve všeobecnou známost v Evropě a Asii kolem 18. století. V zakřiveném ohýbání se projevují jisté zákonitosti převzaté z jeho prizmatické varianty. Systematická studie CCF a její aplikace v designu začala prací Josefa Alberse, učitele na Bauhausu, v roce 1927. Následně byla v 70. letech dále rozvíjena teoretickým informatikem Davidem Albertem Huffmanem a umělcem Ronaldem Reschem. Zatímco Huffman se zabýval zejména matematickým a geometrickým vyjádřením zakřivených ohybů, Resch ji rozvíjel umělecky. [4] [7] [25]



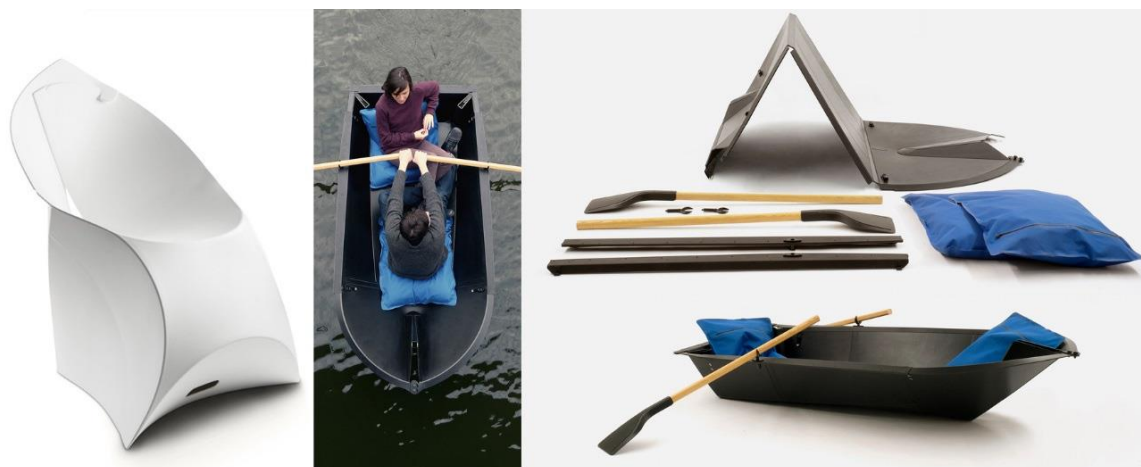
obr. 2-9 David Huffman [4]

K aplikaci zakřiveného ohýbání v designu došlo díky dánskému architektovi Poulu Christiansenovi a firmě Le Klint v 70. letech minulého století. Firma Le Klint se od svého vzniku v roce 1943 zabývala výrobou svítidel inspirovaných prizmatickým origami. Christiansen vytvořil několik návrhů lamp pomocí metody curved folding. Lampy jsou vyráběny ručně ze stínidlové folie a firma Le Klint některé z nich (např. model 172, viz obr. 2-10) prodává dodnes. [4] [11] [25]



obr. 2-10 Poul Christiansen: Lampa Le Klint 172 [11]

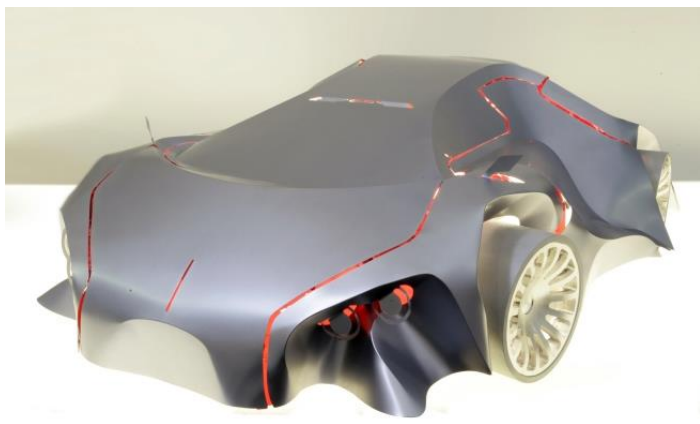
Dalšími zajímavými příklady aplikace CCF geometrie na konkrétní produkt je například nizozemská firma Flux, která vyrábí skládací nábytek z polypropylenu, a Folding Boat od Maxe Frommelda a Arna Mathiese. Oba tyto výrobky plně využívají vlastnosti geometrií vzniklých zakřiveným ohýbáním, zejména rozvinutelnost. Flux Chair je skládací židle z polypropylenu, která se bez potřeby jakéhokoli nářadí dá během okamžiku sestavit z původního plochého stavu. Zároveň vypadá velmi netradičně a její tvarování bezesporu zaujme. Folding Boat staví na podobném konceptu, tedy skládací věc, kterou v místě potřeby uživatel složí a použije. V tomto případě je tvarování čistě funkční. [25]



obr. 2-11 Vlevo: Flux Chair od Flux furniture. Vpravo: Folding Boat od Maxe Frommelda a Arna Mathiese. [25]

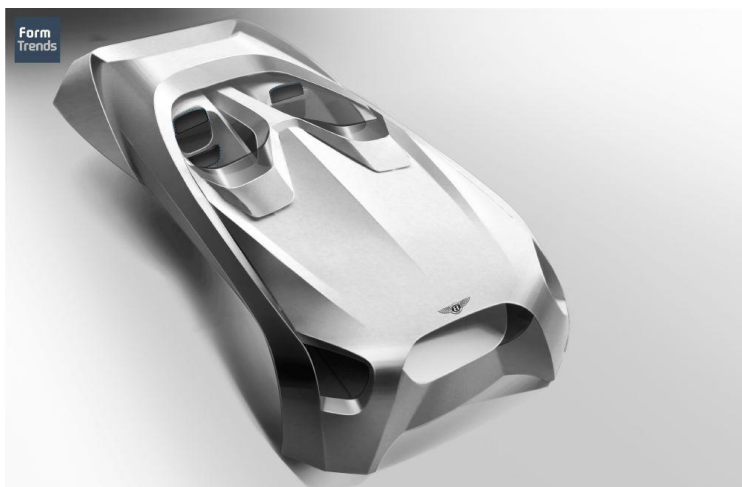
2.2.2 Zakřivené ohýbání v designu karoserií

S vývojem průmyslových robotů vznikl nový způsob produkce předmětů tvarovaných pomocí CCF. Touto problematikou se zabývá britská firma RoboFold od roku 2008. Gregory Epps, zakladatel této společnosti, vytvořil koncept automobilu pomocí zakřiveného ohýbání jako demonstraci možností robotické výroby. Výsledné tvarování jeho metody, která začíná mačkáním papíru a má velký expresivní potenciál. [4] [5] [11]



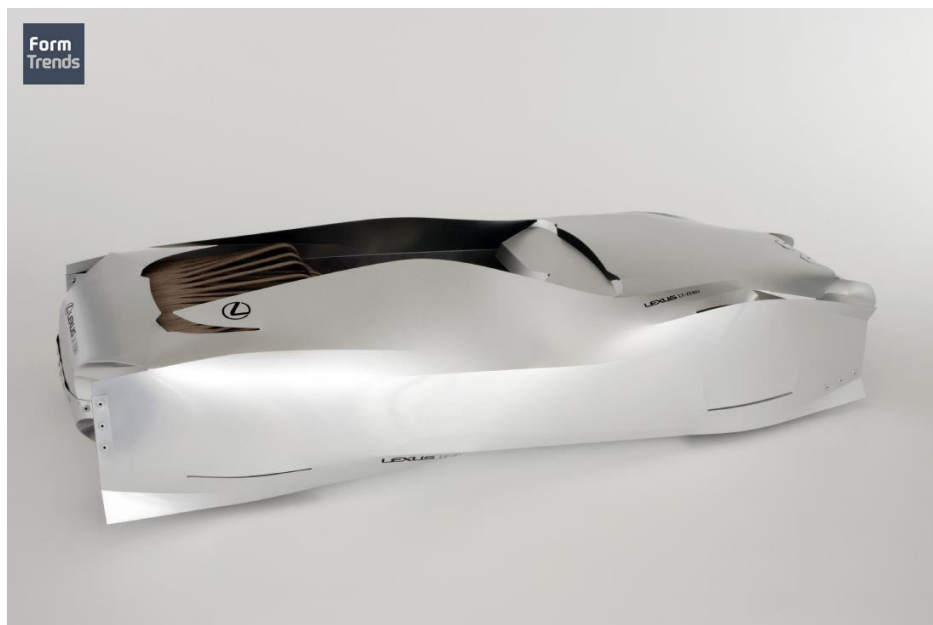
obr. 2-12 Gregory Epps: Design automobilu [25]

Spoluprací s londýnskou společností RoboFold a Royal College of Art vznikly i další koncepty karoserií automobilů. Konkrétně se jedná o Bentley Tailor Made vytvořený studentkou Kyungeun Ko ve spolupráci s automobilkou Bentley. Tvarosloví této automobilky se výrazně projevuje na koncepčním návrhu. Na rozdíl od Eppsova konceptu je Bentley Tailor Made složeno ze čtyř dílů, což autorce částečně poskytlo větší svobodu při tvarování. Implementace zakřiveného ohýbání do návrhu přinesla zcela nové estetické pojetí karoserie. Organické elegantní tvarování vytváří velmi příznivý výsledný dojem, ladné zakřivené plochy přechází do ostrých linií a tvoří osobitý výraz automobilu. Koncept je tvořen jako luxusní automobil pro vyšší třídu, čemuž odpovídá elegantní tvarování. [12]



obr. 2-13 Kyungeun Ko: Bentley Tailor Made [12]

Druhým konceptem, který vznikl díky spolupráci RoboFoldu a studentem Royal College of Art je Lexus LF-Zero. Autor Jan P. Rosenthal v tomto případě volil podobně jako Epps jednoduchou karoserii, na rozdíl od něj však zvolil jiný způsob tvarování: jednoduché ohyby a průhyby v kombinaci s ořezáváním a prořezáváním materiálu. Jednoduché dynamické tvarování evokuje sportovní automobil a snaží se korespondovat s tvaroslovím značky Lexus. [13]



obr. 2-14 Jan P. Rosenthal: Lexus LF-Zero [13]

Závěr

CCF geometrie nejsou v dnešní době široce rozšířené, což je způsobeno nejen komplexností této problematiky, ale i nedostatkem výrobních možností. Výše uvedené produkty svědčí o aplikovatelnosti této metody v mnoha směrech a využitelnosti vlastností rozvinutelných ploch k funkčnímu obohacení designu výrobků. Příklady roboticky vyráběných karoserií nasvědčují, že metoda může vést k netradičnímu progresivnímu tvarovému řešení.

2.2.3 Design karoserií současných pneumobilů

Pneumobil Airrari

Závodní monopost týmu Airrari ze strojní fakulty Univerzity v Szegedu získal speciální cenu za design karoserie v 10. ročníku soutěže Aventics Pneumobile competition v roce 2017. Tato karoserie je vyrobena z laminátu. Aerodynamické organické tvarování odpovídá koncepci závodního monopostu, celá karoserie navíc působí jednoduše a kompaktně. Nevýhodou může být absence agresivnějšího dynamického výrazu, která je částečně zapříčiněna nepřítomností výraznějšího tvarového prvku. Za dobře zvolenou se dá považovat barevnost, která odpovídá připodobnění k Ferrari. Grafické uspořádání sponzorů týmu a startovního čísla na karoserii nijak neruší. [2][8]



obr. 2-15 Pneumobil Airrari [8]

Pneumobil DE-PuffAIR

Tento pneumobil vznikl na Univerzitě v Debrecínu a stal se prvním pneumobilem, který získal speciální cenu za design karoserie, která se začala udělovat během 9. ročníku soutěže v Egeru. Organické tvarování karoserie, která celkovým dojmem působí nevyváženě, částečně kryje i přední kola. Tvar z kapoty vystupuje směrem vzhůru, což může nepříznivě ovlivnit zorný úhel pilota pneumobilu. Barevné řešení působí lehce rušivě až zbytečně. V přední části červená barva simuluje nárazník automobilu, na blatníku zase nepříznivě opticky ovlivňuje jeho tvar. Nahodilé rozložení logotypů sponzorů po celém vnějším povrchu karoserie podtrhuje poněkud chaotický výraz. Karoserie je vyrobena z laminátu. [2]



obr. 2-16 Pneumobil DE-PuffAIR [10]

Pneumobil Javelin

Jde o současný monopost závodního týmu Pneumobil Racing Team Brno z VUT. Karoserie je vyrobena laminováním z kompozitu na bázi karbonových vláken, což jí zajišťuje požadovanou lehkost a pevnost. Kompaktnost aerodynamického tvaru lehce ruší spoiler v přední části pneumobilu, který kryje přední část konstrukce podvozku. Kapota plynule přechází v boky a kryje prostor za předními koly vozidla. V této části však vzniká příliš velká, jednolitá plocha, která působí těžkopádně. Karoserie je v zadní části vozidla náhle ukončena podle konstrukce podvozku, což může působit nedokončeně. Tvarování je podpořeno barevným členěním, konkrétně stříbrnými pruhy na kapotě, které podporují směrovost a dynamiku vozidla. [3]



obr. 2-17 Pneumobil Javelin [3]

Pneumobil Gyalogkakukk

Monopost Gyalogkakukk reprezentoval na soutěži maďarskou Budapest University of Technology and Economics v letech 2009-2011. V roce 2011 se stal dokonce celkovým vítězem soutěže. Na první pohled je patrný významný rozdíl jak v konstrukci podvozku tohoto monopostu, tak i ve tvarování karoserie. Na rozdíl od předchozích zástupců je jeho karoserie vyrobena odlišnou technologií, a to ohýbáním rovinného kusu materiálu. Rovné ohybové hrany dodávají karoserii zajímavý krystalický charakter a agresivní výraz. Barevná kombinace černé s bílou tento výraz ještě zdůrazňuje. Grafické řešení a umístění log nijak neruší. [2]



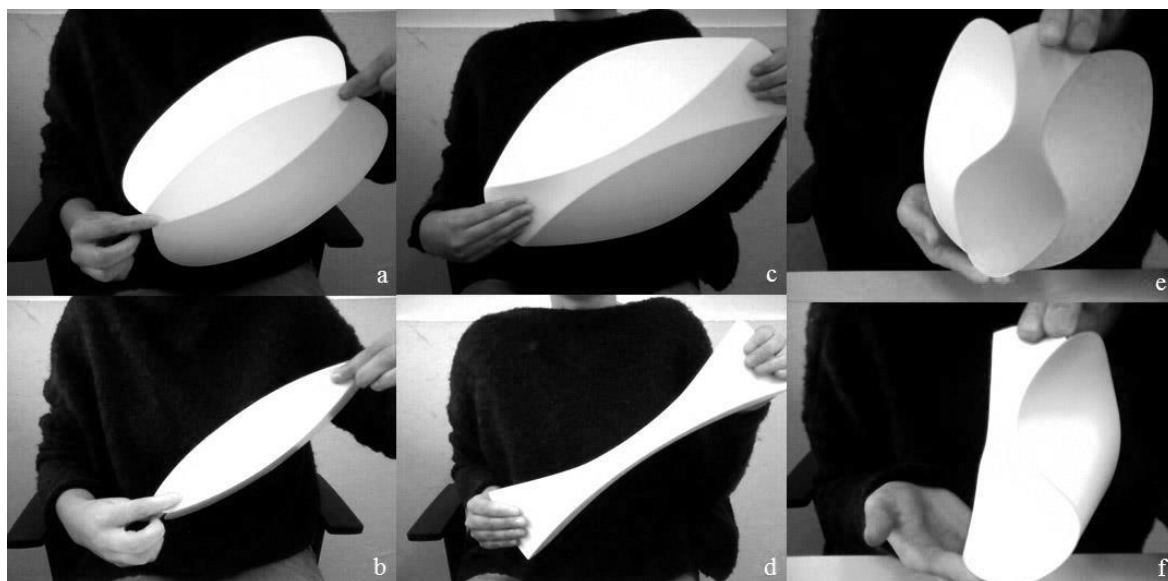
obr. 2-18 Pneumobil Gyalogkakukk [9]

Zhodnocení designu stávajících karoserií

Karoserie současných pneumobilů jsou převážně vyráběny technologií laminování, která umožňuje velkou variabilitu tvarování a využití velmi lehkých materiálů. Tvar karoserie je nezanedbatelnou měrou závislý na konstrukci a koncepci vozidla a zásadně ovlivňuje celkový vzhled. Každý tým přistupuje k řešení karoserie jinak, vzhledem k různým zdrojům na jejich domovských univerzitách. Estetická stránka u současných monopostů samozřejmě nemá prioritu před technickými vlastnostmi vozidel. V posledních ročnících však přibývají pneumobily se zajímavým designérským řešením karoserií. To může být podpořeno také zavedením speciální ceny za design karoserie, která se uděluje od roku 2016.

2.3 Curved-Crease Folding

Curved-crease folding, neboli zakřivené ohýbání, vychází z origami a spočívá v ohýbání rovinného materiálu (např. papíru, plechu) podle zakřivených linií. Tím vznikají třidimenzionální plochy, které jsou rozvinutelné, ale obsahují oblasti s nenulovou hlavní křivostí. Tato vlastnost může být využita v designu, architektuře či umění, čemuž napomáhá i fakt, že velké množství materiálů je distribuováno v plošných kusech. Designer je tedy může tvarovat bez nutnosti lisování či odlévání. Ručním ohýbáním stínidel z folie jsou produkovány výrobky firmy Le Klint dodnes (viz obr. 2-10). Rozvoj v oblasti průmyslových robotů umožňuje průmyslovou produkci těchto tvarů. Ohýbání je totiž možné provést pomocí 6-osého průmyslového robota. [4][14]



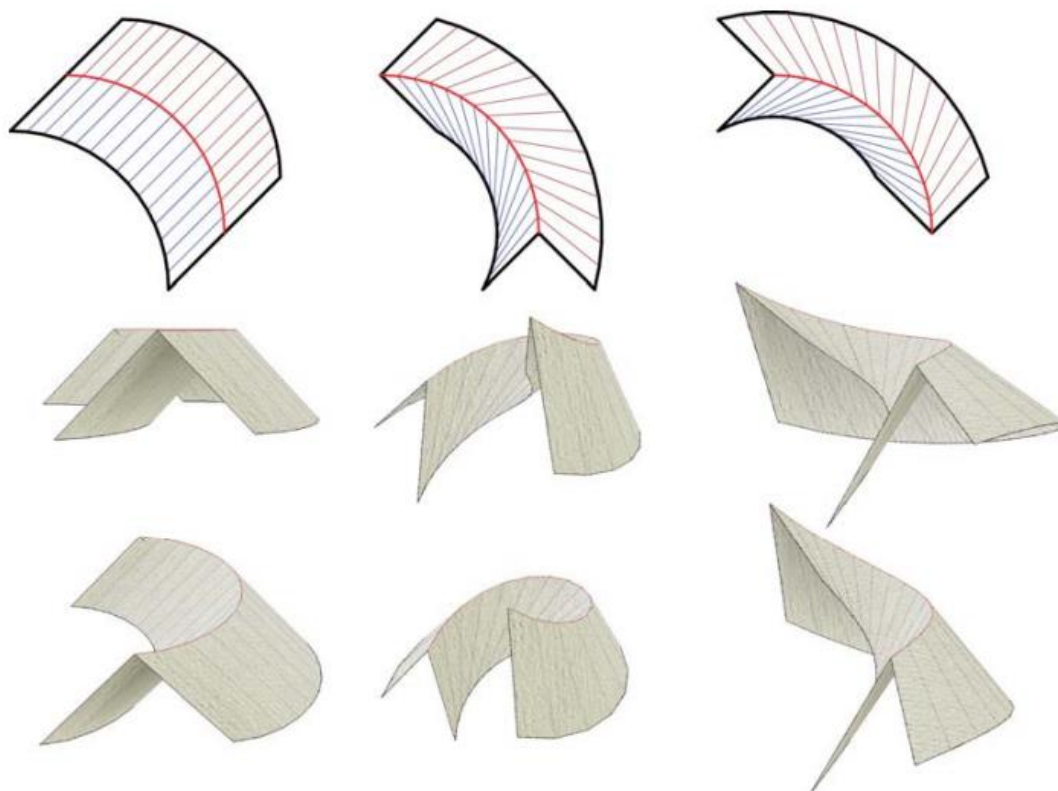
obr. 2-19 Proces ohýbání různých ohybových vzorů. [5]

Rozvinutelná plocha musí splňovat jisté matematické náležitosti. Musí být isometricky namapovatelná na rovinnou plochu bez zkreslení délek a úhlů, což z ní dělá speciální druh přímkové plochy s Gaussovskou křivostí rovnou 0. Každá rozvinutelná plocha je zároveň přímkovou plochou (ruled surface), tedy každým jejím bodem lze proložit přímku, která této ploše náleží. Tato přímka se nazývá tvořící přímka přímkové plochy či površka (ruling) a je zároveň průnikem tečné roviny s rozvinutelnou plochou. Kromě roviny existují tři základní typy rozvinutelných ploch: zobecněný válec, zobecněný kužel a tangentní plocha (plocha jejíž řídící přímky jsou tangentní k obecné křivce v prostoru, kterou nazýváme hrana vratu). [4][5][15]



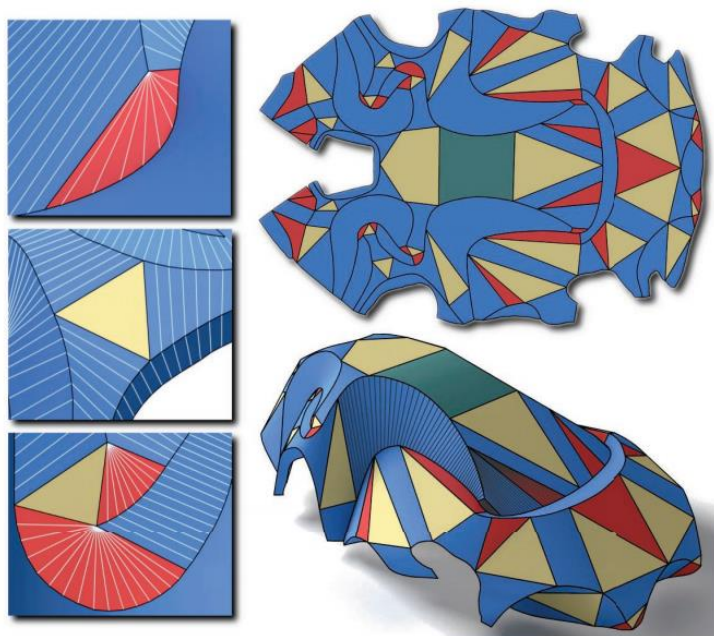
obr. 2-20 Fotografie vlevo ukazuje ohybovou křivku na rozvinutém papíru. Na fotografii uprostřed je zachycen základní tvar vytvořený přehnutím podél ohybové křivky. Fotografie vpravo zachycuje pokroucenou verzi základního tvaru vzniklou fyzickou interakcí s papírovým modelem [5]

Jednoduchou reprezentaci rozvinutelné plochy může představovat například list papíru. Zvedneme-li jeden roh papíru ze stolu, list se prohne a tím vzniká obecná rozvinutelná plocha. Pokud papír přehneme podél křivky, vznikne CCF geometrie skládající se ze dvou rozvinutelných ploch a přehybu (crease). Pro jednu jedinečnou ohybovou křivku existuje nekonečné množství párů ploch, které mohou být vytvořeny přehybem podél této křivky. Přehybem vznikne základní tvar, další fyzickou interakcí s papírem může být vytvořeno nekonečné množství zkroucených variací tohoto přehybu (viz **obr. 2-20**). Pro každou z těchto variací existuje unikátní uspořádání površek, z čehož vyplývá, že jejich pozice hraje podstatnou roli v geometrickém modelování zakřivených ohybů. [5][6]



obr. 2-21 Vliv površek na zkroucení výsledné geometrie. Vlevo: Nezkroucený ohyb s rovnoběžnými površkami. Prostřední a vpravo: Zkroucené ohyby s excentricky uspořádanými površkami. [24]

Rozvinutelný tvar vytvořený pomocí zakřiveného ohýbání je v geometrickém slova smyslu tvořen výše zmíněnými základními typy rozvinutelných ploch, které hladce navazují jeden na druhý (křivostní návaznost). Přestože jednotlivé části mají relativně jednoduchý tvar, jejich vzájemným spojením v kombinaci s přehyby může vzniknout velmi komplexní geometrie (viz obr. 2-22).



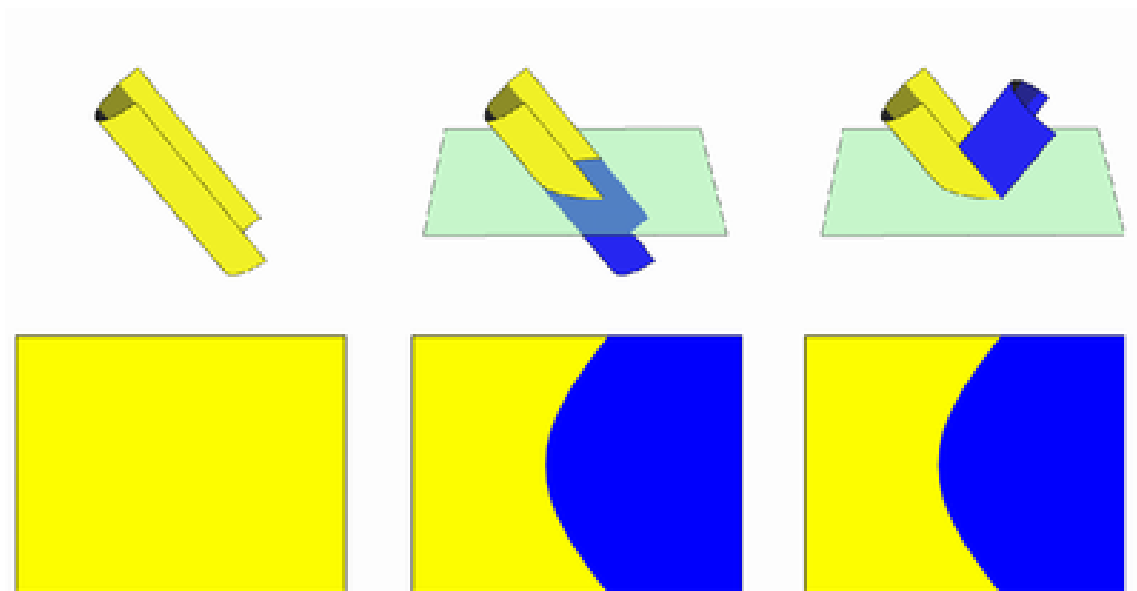
obr. 2-22 Model automobilu a jeho rozvinutí (vpravo nahoře). Rozdělení na jednotlivé části přímkových ploch: roviny jsou označeny žlutě, válcové plochy zeleně, kuželové červeně a tangentské plochy modře. [25]

2.3.1 Metody popisu CCF geometrií

Pro širokou aplikaci CCF geometrií v různých odvětvích je třeba vytvořit vhodné interaktivní nástroje pro jejich tvorbu. K tomuto účelu je však potřeba plně pochopit jejich geometrickou podstatu a matematicky je popsat. Rozvinutelné plochy nelze reprezentovat pomocí jednoduchých parametrů jako NURBS plochy. Vzhledem ke komplexnosti této problematiky zatím neexistuje univerzální reprezentace CCF geometrií. To se projevuje v nedostatku dostupných digitálních nástrojů. Hlavní známé přístupy určené k porozumění a využití zakřiveného ohýbání jsou popsány níže. [25]

Konstrukčně-geometrický přístup

Jednou z nejjednodušších metod tvorby CCF geometrií s více než jedním přehybem je využití reflexe. Tato metoda vychází z jednoduché rozvinutelné plochy, která je ořezána rovinou a následně podle této roviny zrcadlena. Reflexe (**obr. 2-23**) je speciálním případem zakřiveného ohybu, kde přehyb leží na jediné oskulační rovině.



obr. 2-23 Metoda reflexe [15]

Diferenciální geometrická analýza

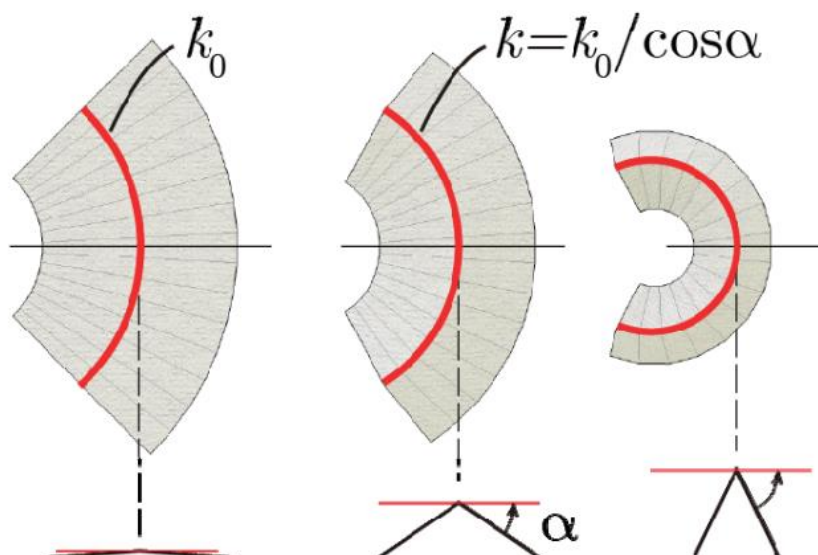
Jednou z možností popisu a pochopení zakřiveného ohýbání je využití diferenciální geometrie. Tato metoda je rozvinuta v několika studiích, např. Davidem Huffmanem v roce 1976 [26] či Fuchsem a Tabachnikovem [6]. Nejdůležitější teoremy jsou shrnuty níže. [5]

Teoremy popisující obecné chování kolem přehybu:

- Sousedící body na zakřiveném přehybu mají různé oskulační roviny. [5][26]
- V každém bodě na zakřiveném přehybu svírají tangentní plochy obou ploch stejný úhel s oskulační rovinou v tomto bodě. [6][26]
- Procesem zakřiveného ohýbání vznikají dvě plochy, které mají stejné a opačné normálové křivosti podél ohybové linie. [5]
- V celé deformaci zůstává geodetická křivost stejná, jako původní křivost ohybové křivky v rozvinuté rovině. Výsledkem je následující rovnice:

$$K(t)\cos\alpha(t)=k(t)$$

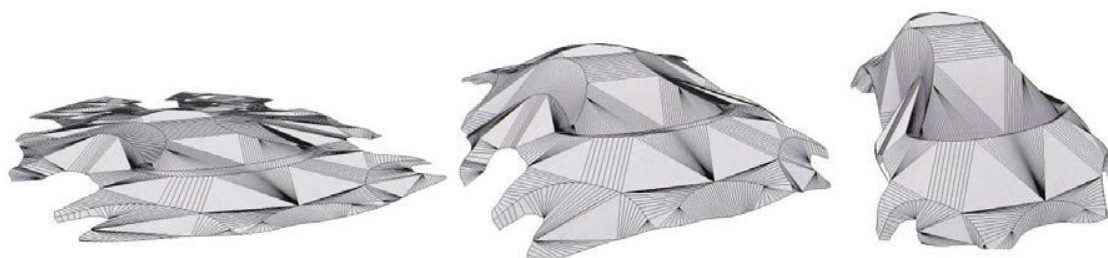
kde $K(t)$ je křivost původní planární křivky, $\alpha(t)$ úhel oskulační roviny a plochy a $k(t)$ křivost prostorové křivky. [5][6]



obr. 2-24 Vztah křivosti a ohybového úhlu [24]

Teorémy popisující speciální případy:

- Pokud je zakřivený přehyb planární (oskulační rovina je stejná pro všechny jeho body) pár površek v každém bodě přehybu svírá s touto rovinou stejný úhel. [5][26]
- Pokud zůstává zakřivený přehyb planární během deformace, pak jsou površky obou ploch v rozvinutém stavu kolineární. [5][6]
- Pokud zůstává zakřivený přehyb planární během deformace, plocha na jedné straně přehybu je zrcadlovým odrazem druhé plochy podle oskulační roviny. [5][6]
- Pokud úhel ohybu mezi plochami na zakřiveném ohybu zůstává konstantní po celé délce, pak površky svírají stejné úhly s normálami k ohybové křivce v rozvinutém stavu. Jedna z těchto ploch je kužel (površky procházejí jedním bodem), druhá je válec (površky jsou rovnoběžné). [5][6]
- Svírají-li všechny površky s přehybem pravý úhel, je dihedrální úhel mezi plochami konstantní ve všech bodech přehybu a ten leží v jediné oskulační rovině. Obě plochy jsou kuželové (a jejich površky všechny prochází jedním bodem). [5][6][26]



obr. 2-25 Simulace ohýbání modelu automobilu [15]

Přestože tyto teorémy přispěly k lepšímu pochopení chování površek podél zakřiveného ohybu, nenabízí obecnou metodu popisu ohybového procesu či tvoření nových tvarů pomocí simulace. Poznatky, které přinesla, se však ukazují velmi nápomocné při tvorbě nástrojů pro digitální modelování založených na jiných metodách. [5]

Diskrétní geometrický přístup

Jak je psáno výše, pro zakřivený přehyb existuje nekonečné množství zkroucených variací základního tvaru, přičemž rozmístění površek je pro každou variaci unikátní. Díky těmto faktům můžeme pomocí stanovení površek a zjednodušení plochy na planární čtyřúhelníkovou mesh (PQ mesh) získat mechanismus s jedním stupněm volnosti. [5]

Využití geometrického přístupu k simulaci ohýbacího procesu umožňuje velice rychlou a jednoduchou cestu k porozumění chování zakřiveného ohybu a třídímenzionálního tvaru vzniklého z ohybového vzoru. Tato metoda je dostačující v počátečních fázích návrhu, k tvorbě konceptů, 3D modelů a renderů. Nicméně nesmíme zapomínat, že tato simulační metoda je pouze aproximací reality. Jde pouze o geometrický přístup, což znamená, že nebere v úvahu žádné materiálové vlastnosti, tloušťku materiálu, síly, napětí atd. Z tohoto důvodu může být výhodné pro návrh a výrobu CCF geometrií použít také metodu konečných prvků [5]

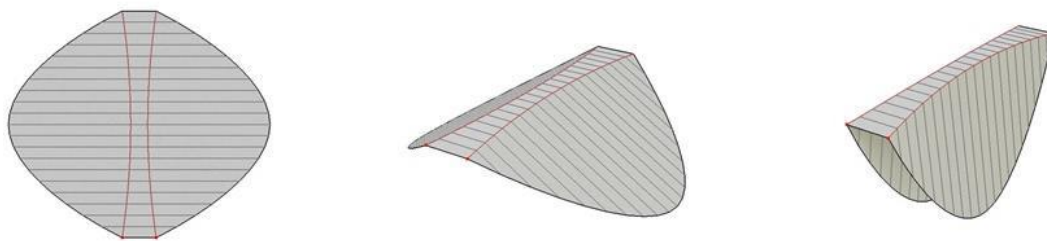
2.3.2 Softwarové nástroje

ORI-REF

ORI-REF je jednoduchý program založený na metodě reflexe. K vytvoření CCF geometrie je třeba nahrát triangulovanou mesh reprezentující základní rozvinutelnou plochu, na které poté uživatel tvoří přehyby dle libosti. Ovládání je intuitivní, možnosti tohoto nástroje jsou však značně omezené. Nenabízí navíc možnost vytvořenou geometrii rozvinout, autor k tomuto účelu doporučuje externí aplikaci. [15]

Freeform Origami

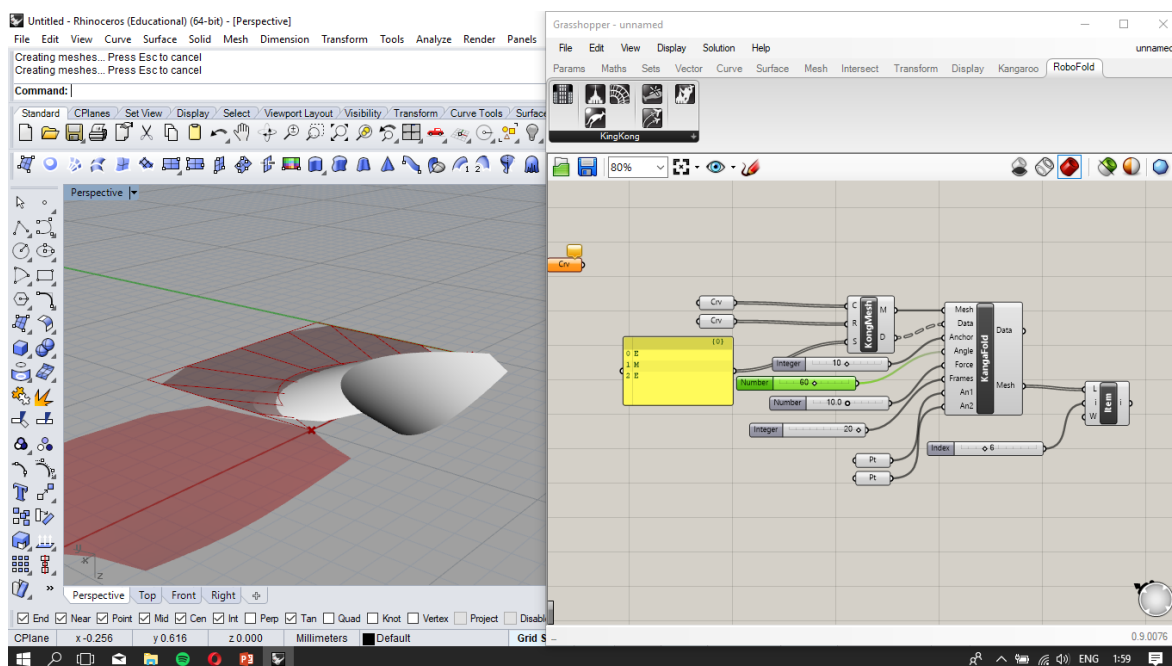
Simulační program, který vyvinul Tomohiro Tachi z japonské University of Tokio, využívá k simulaci ohýbání PQ meshe. Ohybové křivky jsou upraveny na lomené čáry a přilehlé plochy jsou rozděleny na čtyřúhelníkové fasety podle površek. Program následně poskytne interaktivní animaci ohýbání. Volba površek předurčuje chování ohybu a výsledný třídímenzionální tvar. [5][26]



obr. 2-26 Příklad upraveného ohybového vzoru a jeho ohybu pomocí nástroje Freeform Origami [15]

KingKong

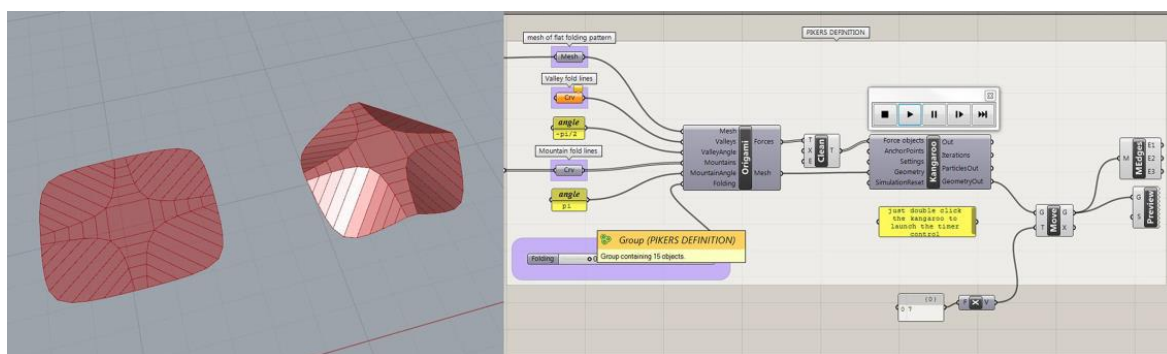
KingKong je plugin pro Grasshopper, nástroj pro parametrické modelování v CAD softwaru Rhinoceros. Software byl vyvinut firmou RoboFold k simulování zakřivených ohybů a parametrickému tvoření pole z CCF panelů. Plugin automaticky tvoří stejnoměrně rozmístěné površky, díky tomu může být užíván bez větších znalostí vlivu površek na ohýbání. Zkušenější uživatel však brzy narazí na omezení tohoto nástroje. Script použitý k simulaci ohýbání není přístupný, a tak nedovoluje uživateli ovlivnit nebo pochopit proces ohýbání. Také je omezený pouze na vcelku jednoduché ohyby a s komplexnějšími tvary (např. obr. 2-28) si nedokáže poradit. [5][14][17][18]



obr. 2-27 Modelování rozvinutelné plochy pomocí softwaru KingKong

Kangaroo

Další plugin pro Grasshopper, určený k vytváření interaktivních simulací, optimalizací a tvarování v Rhinoceros. Autor, Daniel Piker, vytvořil komponentu Origami, která umožňuje uživateli definovat mesh a určit „mountain“ a „valley“ ohyby. Komponenta slouží jako zdroj dat pro Kangaroo Live Physic engine. Výsledkem je všestranný a uživatelsky přívětivý nástroj. Velkou výhodou je přístupnost samotné Origami komponenty, která je vytvořena jako definice v Grasshopperu s otevřeným přístupem, je tedy možné ji v případě potřeby upravovat. [5][27]



obr. 2-28 Vytvoření simulace zakřiveného ohýbání pomocí pluginu Kangaroo [5]

2.3.3 Metody pro tvorbu CCF geometrií

Specifické přístupy pro tvorbu CCF geometrií navrhl a popsal Richard Duks Koschitz ve své práci Computational Design with Curved Creases: David Huffman's Approach to Paperfolding:

Cylinder and cone reflection

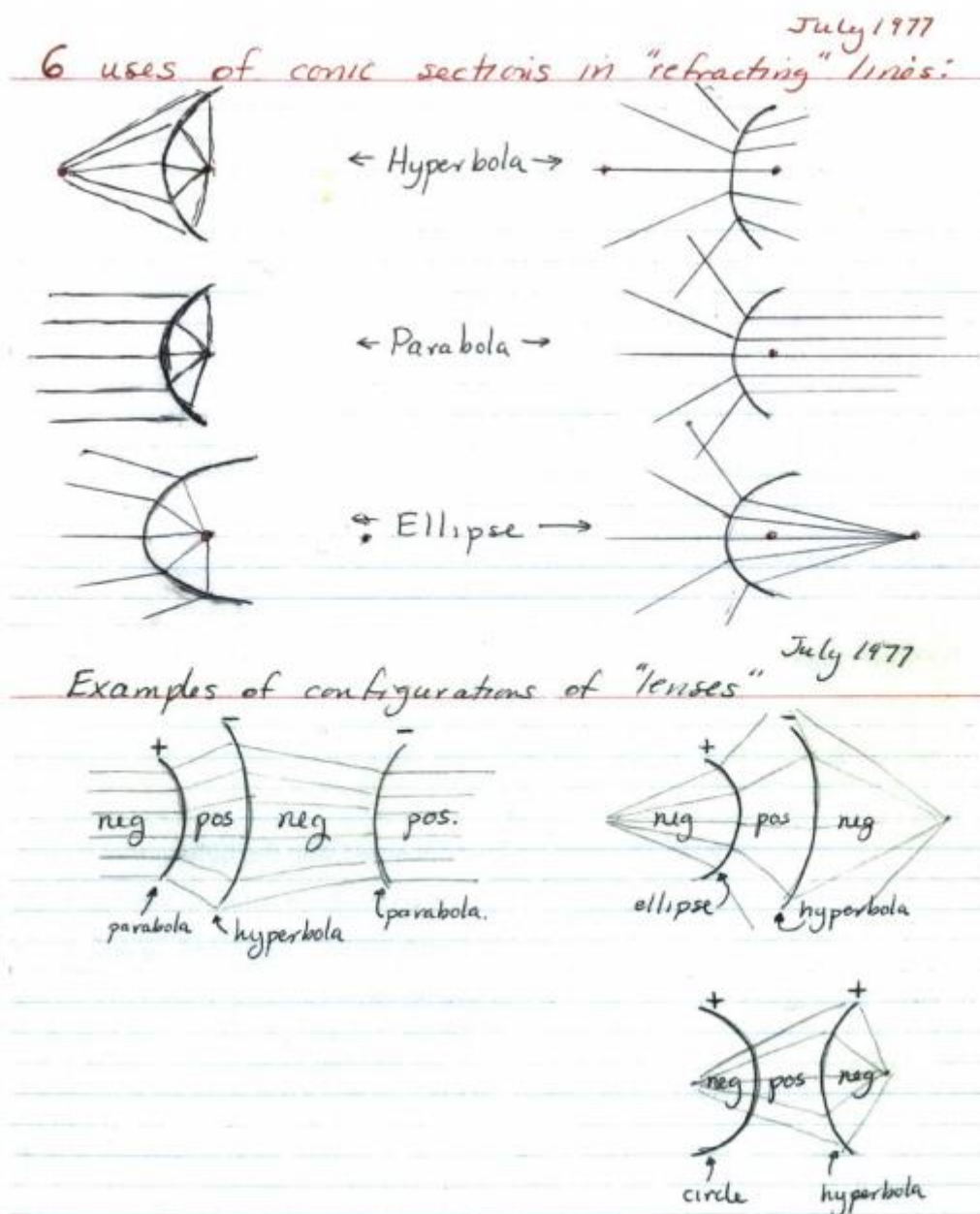
Tato metoda popisuje návrhové možnosti pomocí velmi dobře známých geometrických útvarů – kuželů a válců. Přístup je založen na metodě reflexe, která se dá považovat za nejjednodušší cestu k získání rozvinutelných ploch se zakřivenými ohyby. Designer má možnost přímo manipulovat s digitálním 3D modelem prostřednictvím softwaru (ORI-REF). Modely mohou být celkem jednoduše vytvořeny i pomocí papíru. [4]

Closed curved creases

Rozvíjí práci studentů Bauhausu v základním kurzu Josefa Alberse. Designer pracuje s konkrétním ohybovým vzorcem a objevuje jeho variace, aniž by přesně věděl, jaký bude výsledek. Vzorec tvoří soustředné kruhy nebo křivky a díra uprostřed. Je velmi těžké předpovědět, jak bude tento vzorec vypadat ve složeném stavu, tento prvek překvapení může být užitečný. Takový přístup také umožňuje designérovi zjistit do jaké míry může být model ohýbán. [4]

Curved crease gadgets

Přístup, který byl popsán a hojně využíván Davidem Huffmanem, je založen na kuželosečkách a předurčení polohy a orientace povrchek. Elementární jednotkou tohoto systému je tzv. gadget, tedy soubor ohybové křivky a předurčeného chování povrchek na obou stranách. Gadgety využívají refrakčních vlastností kuželoseček (podobně jako optické čočky). Pomocí této metody vznikají tzv. uniform folds, tedy ohyby, kde obě rozvinutelné plochy spojené přehybem svírají po celé jeho délce stejný úhel. Metoda umožňuje využití simulačních softwarů, nicméně k využití gadgetů pro navrhování je nezbytná znalost geometrie.



obr. 2-29 Příklady gadgetů podle Huffmana [4]

Step by step evaluation

Ohybové křivky jsou volně nakresleny rukou. Výsledkem je, že ani křivky ani plochy nejsou přesně definovatelné. Přístup spočívá prostě v nakreslení křivky, ohnutí tvaru a zhodnocení výsledku. Designer může vytvářet jeden ohyb po druhém, dokud výsledek není uspokojivý. [4]

Sculpting and digitizing

Přístup, který nevyžaduje žádné důkladné znalosti geometrie. Designer objevuje návrh vytvářením modelů z papíru. Během tvoření si vytvoří zaznamenávací systém, aby měl přehled o změnách tvaru. Designer vytvoří požadovaný tvar z papíru, označí si ohybové křivky (údolí a hory) poté papír znovu narovná, aby mohl ohybový vzorec zdigitalizovat. [4]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Současný způsob výroby karoserií pro závodní monoposty Pneumobil Racing Team Brno trpí technologickou složitostí a výraznou časovou náročností výrobního procesu. Nutnost výroby formy pro laminování dobu výroby značně prodlužuje a vzhledem k faktu, že se jedná o kusovou výrobu a forma je využita k produkci pouze jedné karoserie, je výrobní proces neefektivní. Forma vyrobená z extrudovaného polystyrenu technologií frézování navíc trpí povrchovými nedostatky, které se projevují na nanesených vrstvách laminátu, a tedy na kvalitě povrchu karoserie. Ten musí být dodatečně ošetřen povrchovou úpravou, což výrobu dále komplikuje a prodlužuje.

Robotická výroba s využitím CCF geometrií je zajímavou alternativou k tradičnímu výrobnímu procesu. Tato progresivní technologie může napomoci snížení výrobních nákladů či času výroby karoserie, zároveň má výrazný vliv na vizuální stránku a charakter karoserie. Pro aplikaci této technologie je nezbytné důkladně zhodnotit tvarové možnosti CCF geometrií a také způsob a náročnost jejich navrhování. Tyto aspekty mají nezanedbatelný vliv nejen na výsledný design, ale i na samotný návrhový proces.

Povaha soutěže studentských týmů Aventics Pneumobile Competition podporuje nová a neobvyklá řešení při konstrukci závodních pneumobilů. To může být dalším důvodem k využití netradiční robotické technologie pro výrobu karoserie.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Pneumobily, které se zúčastňují posledních ročníků soutěže Aventics Pneumobile Competition v Egeru, odrážejí odlišné přístupy studentských týmů z různých evropských univerzit ke konstrukci a designu jednotlivých monopostů. To se odráží také v relativní pestrosti samotných karoserií i použitých metod výroby.

Výroba karoserie pomocí průmyslového robota se jeví jako perspektivní řešení, které by v budoucnu mohlo nahradit tradiční laminování využívané studentským týmem Pneumobil Racing Team Brno. Navrhování produktu pro tento specifický způsob výroby je v současné době částečně omezeno nedostatkem metodiky navrhování ale zejména nedostatkem vhodných CAD softwarových nástrojů, který je důsledkem neúplnosti matematického popisu CCF geometrií.

3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Nový výrobní proces karoserie s využitím ohýbání plátového materiálu pomocí 6-osého průmyslového robota může přinést velké množství výhod, zkrácením výrobních nákladů počínaje a progresivním stylistickým řešením konče. Podstatou této práce je praktické ověření přínosů nové metody na reálném projektu a samotné proveditelnosti. Toho by mělo být dosaženo návrhem karoserie pneumobilu na existující podvozek při zachování uživatelských a funkčních potřeb karoserie. Výsledný design karoserie bude reflektovat uživatelské a funkční potřeby karoserie, jako je servis a údržba vozidla atd. Jako vhodné se jeví užití dynamického a esteticky atraktivního tvarování, které bude korespondovat s podstatou závodního monopostu.

S ohledem na povahu designérského úkolu a výše zmíněné poznatky je nutné definovat a popsat vhodnou metodu návrhu CCF geometrií pro řešení daného úkolu. S tím úzce souvisí optimalizace dostupných softwarových nástrojů k urychlení a zjednodušení návrhového procesu, k čemuž bude použit CAD software Rhinoceros a zásuvný modul Grasshopper určený k vizuálnímu tvoření algoritmů. Vyrobitelnost návrhu bude ověřena zhotovením prototypu, případně zmenšeného modelu karoserie. Na závěr bude provedeno srovnání technologie robotického ohýbání s tradičním výrobním postupem po ekonomické, technologické a funkční stránce.

Dílčí cíle diplomové práce:

- Identifikace uživatelských a funkčních potřeb karoserie
- Analýza možností robotické výroby karoserie bez nutnosti celoplošné formy
- Návrh metodiky designu karoserie pro robotickou výrobu
- Výroba modelu karoserie pneumobilu
- Srovnání výhod a nevýhod laminovaných karoserií pneumobilu s navrženým řešením

4 VARIANTNÍ STUDIE DESIGNU

Tato kapitola se věnuje použitým metodám navrhování a variantním studiím, které jsou navrženy na základě poznatků z rešerše, s ohledem na zvolenou technologii výroby. Tvarové řešení karoserie je významně ovlivněno vnitřním uspořádáním pneumobilu a konstrukčním řešením jeho podvozku. Variantní studie vychází z konstrukce pneumobilu Javelin.

4.1 Použité metody designu

Vzhledem k povaze designérského úkolu a specifickým vlastnostem CCF geometrií je třeba zvolit vhodný postup řešení. Z univerzálních návrhových metod se nabízí využít metodu *Research through design*, která považuje návrhový proces za legitimní rešeršní aktivitu, prozkoumává nástroje a procesy designového myšlení a tvoření za účelem zlepšení designových praktik. Další vhodnou metodou je *Prototyping*, tedy tvoření modelů na různých úrovních technické přesnosti a dokonalosti. Tyto prototypy pomáhají lepšímu porozumění vlastnímu konceptu a funkčnosti. Metoda je vhodná v počáteční fázi návrhu, ale i v jeho pozdní fázi, kdy napomáhá lepšímu porozumění a zpětné vazbě od klientů a uživatelů. Užitím těchto dvou univerzálních metod při návrhu CCF geometrií designér získá povědomí o tvarových možnostech zakřiveného ohýbání. [23]

Ze specifických metod navrhování CCF geometrií z kapitoly 2.3.3 jsou pro design nejzajímavější metody *Step by step evaluation* a *Sculpting and digitizing*, které nevyžadují důkladné znalosti geometrie a dovolují volné objevování tvarů. Pro navrhování mají samozřejmě jistý potenciál také standartní designérské postupy, jako je například skicování či plošné modelování, velmi často užívané v automobilním průmyslu. Ty jsou však do jisté míry omezeny designérovou znalostí CCF geometrií a chování rozvinutelných ploch.

4.1.1 Návrhový proces

Následující postup řešení byl navržen na základě autorovy vlastní zkušenosti a nepředpokládá žádné předchozí zkušenosti s navrhováním pomocí CCF geometrií. Během návrhu designér prochází následujícími třemi fázemi:

1. Průzkum

První fází samotného navrhování by mělo být seznámení designéra s tvarovými možnostmi zakřiveného ohýbání. V této fázi návrhu se nejvíce uplatňuje metoda *Research through design* v kombinaci s *Prototypingem* – tvoření abstraktních papírových modelů a následně jejich pozorování a hodnocení. Kombinací těchto dvou metod získává designer vlastní zkušenost s chováním rozvinutelných ploch a CCF geometrií. Velmi přínosné v této fázi návrhu je také vyhledávání různých inspiračních zdrojů, jako je například origami využívající zakřivené ohýbání nebo práce D. A. Huffmanna.



obr. 4-1 Papírové modely

2. Návrh

Po seznámení designera se specifickým chováním CCF geometrií a základními principy jejich tvorby je možné přejít k samotnému navrhování konkrétních tvarů. Stále je zde možné uplatňovat *Prototyping* s využíváním dostupných materiálů, jako papír nebo hliníkový plech (například z plechovek od nápojů). S určitou znalostí a předvídáním chování zakřivených ohybů lze využít i skicování, které má oproti prototypování nespornou výhodu v rychlejším zaznamenání myšlenek. Dalším vhodným nástrojem je plošné modelování, které umožňuje tvořit požadovaný tvar v digitálním 3D prostoru a zároveň alespoň částečně při tvorbě dodržovat principy CCF geometrií.

3. Dokončení

Dokončení návrhu spočívá ve vytvoření přesných ohybových linií a ověření funkčnosti a výrobitelnosti návrhu. Tato fáze může být uplatňována i v průběhu navrhování ke kontrole použitelnosti návrhu. Přesnost ohybového vzoru lze před vytvořením fyzického modelu ověřit pomocí geometrické simulace v CAD softwaru Rhinoceros prostřednictvím zásuvného modulu Grasshopper a fyzického enginu Kangaroo (viz kapitola 2.3.2). Simulace iterační návrhový proces značně urychlí, neboť umožňuje vyhodnocení výsledků ohýbání přímo v digitálním 3D prostoru, což zvyšuje pravděpodobnost dosažení požadovaných výsledků v dalších krocích. Při tvorbě ohybového vzoru je možné vycházet z fyzických papírových modelů. Přesnějšího výsledku je však možné dosáhnout, pokud je k dispozici plošný model CCF geometrie. V případě, že simulace úspěšně splňuje designérovu představu, přichází opět na řadu ověření na fyzickém modelu. Převod ohybového vzoru do fyzické podoby je možné provést různými způsoby, podle požadované úrovně přesnosti. Nejjednodušší a nejméně přesnou možností je využití tiskárny, vyšší přesnosti lze dosáhnout použitím laserové rezačky a gravírky nebo, v případě modelů ze silnějšího materiálu (plech, plastová deska) CNC frézky.

4.2 Variantní návrhy

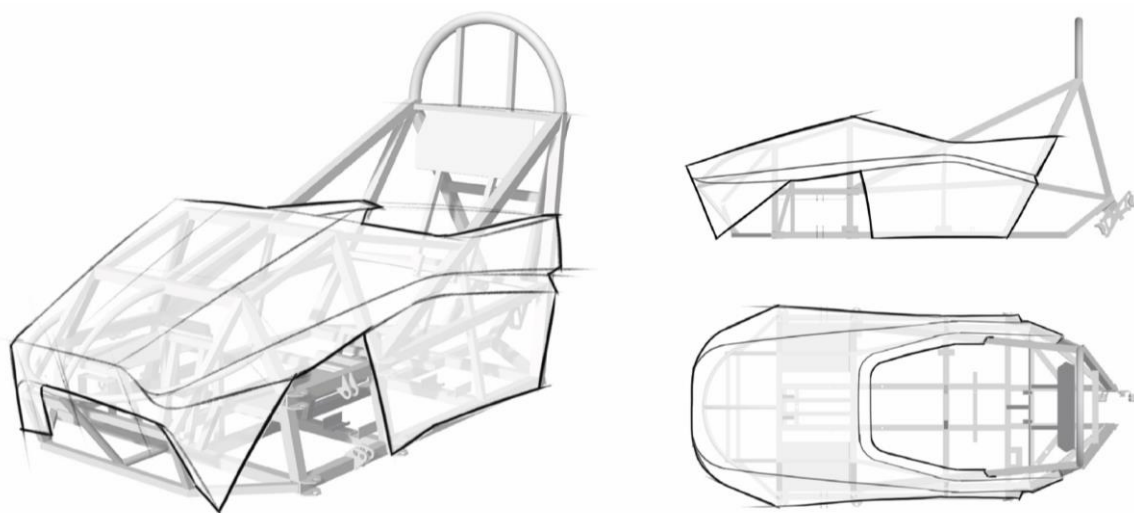
4.2.1 Varianta 1

První variantní řešení bylo navrženo s důrazem na jednoduchost. Nejvýraznějším prvkem je kapota, která plynule přechází v boky a objímá kokpit. Na kapotu navazují menší díly, v přední části je to čelní maska, která plynule přechází do blatníků. V zadní části boční krytí navazuje na kapotu prostřednictvím údolí, které může připomínat prolis. Tento prvek člení poměrně velkou boční část karoserie.

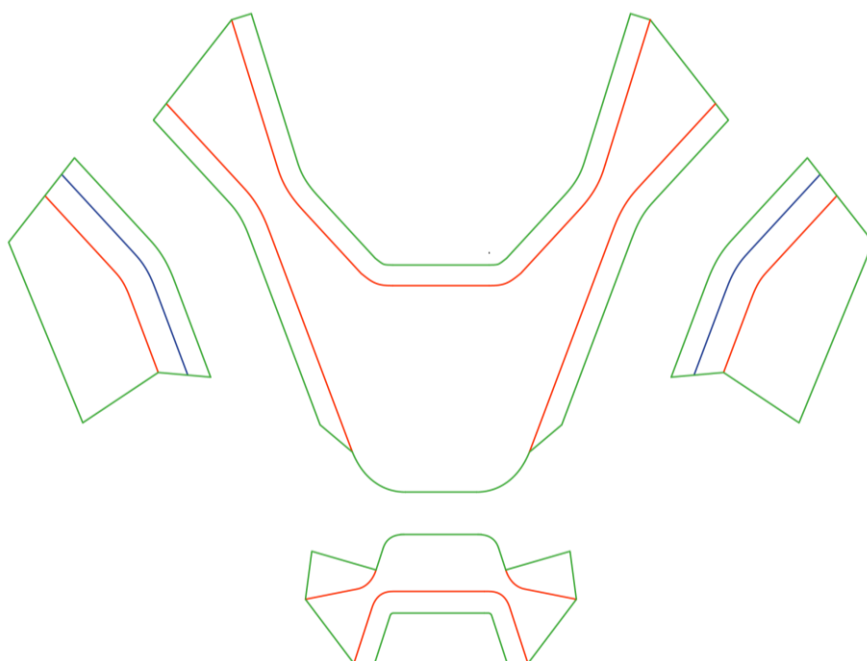


obr. 4-2 Fotografie papírového modelu prvního variantního řešení

Samotný ohybový vzor této varianty naznačuje některé její výhody. Například jednotlivé díly lze v rámci plochy mnohem lépe uspořádat, což přispívá ke snížení výrobních nákladů. Zároveň jednotlivé díly mají menší plošný obsah než předchozí varianta. To vede k nižší váze karoserie. Nevýhodou může být velikost kapoty, která se táhne přes celé vozidlo a její demontování by tím pádem nebylo snadné, což komplikuje servisní přístup k vnitřním komponentám monopostu.



obr. 4-3 Skica prvního variantního řešení



obr. 4-4 Ohybový vzor pro první variantu: okraje – zeleně, hory – červeně, údolí – modře.

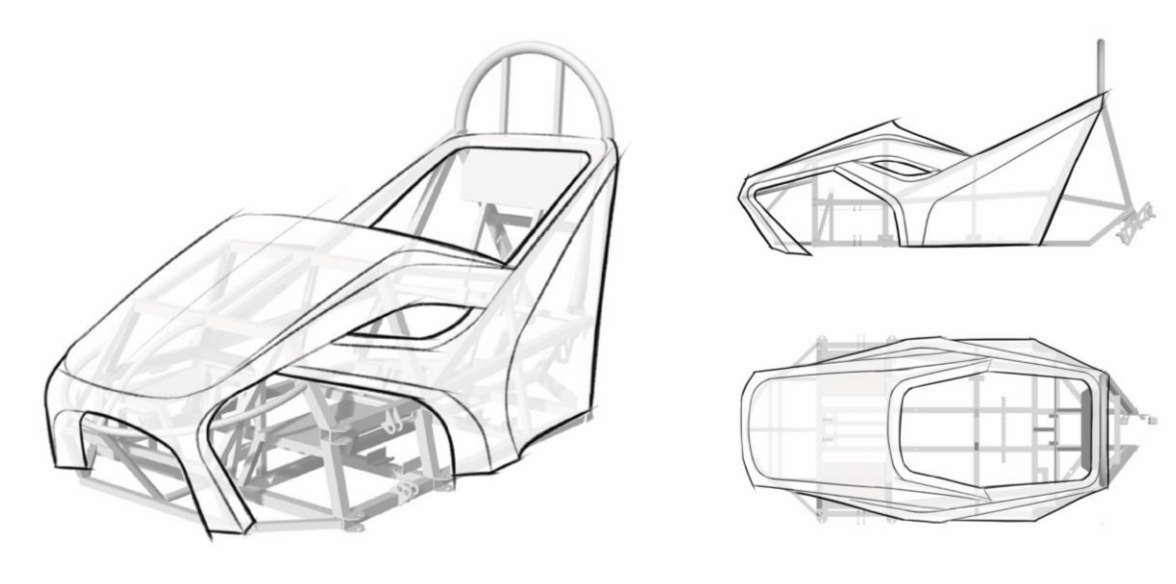
4.2.2 Varianta 2

Druhý přístup k tvarování karoserie reflektuje dynamiku a dravost žádoucí pro závodní monopost. Karoserie se skládá ze tří dílů: přední díl je vytvořen pomocí čtyř křivek, které se po ohnutí potkávají v přední části monopostu, kde tvoří nárazník. Z nárazníku vychází 4 ramena, spodní dvě uzavírají tvar dole, zatímco horní ramena kopírují konstrukci pneumobilu a navazují na kapotu. Zadní díl uzavírá karoserii v zadní a bočních částech.

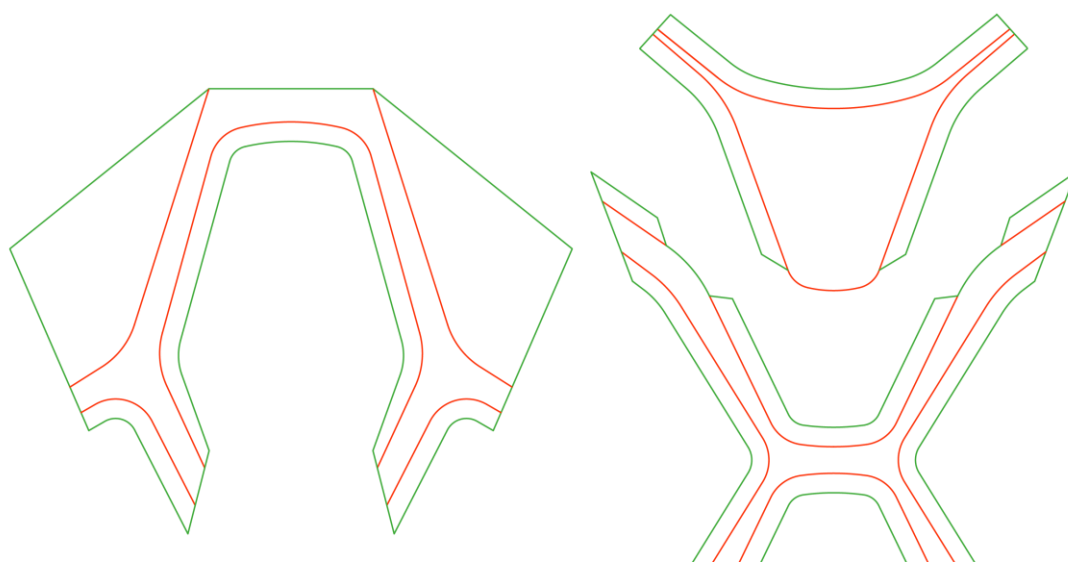


obr. 4-5 Fotografie papírového modelu druhého variantního řešení

Výsledné tvarování první varianty nabízí zajímavé dynamické řešení, ovšem přináší i jistá rizika. Členitost karoserie může být nevítanou překážkou při umísťování grafických značek sponzorů apod. Dlouhá ramena předního a zadního dílu mohou znamenat nepředvídatelné kroucení materiálu a tím komplikovat sesazení karoserie. V neposlední řadě tu je samotný ohybový vzor. Z **obr. 4-7** je patrné, že jednotlivé díly nebude možné plošně uspořádat tak, aby nevzniklo zbytečně velké množství odpadního materiálu.

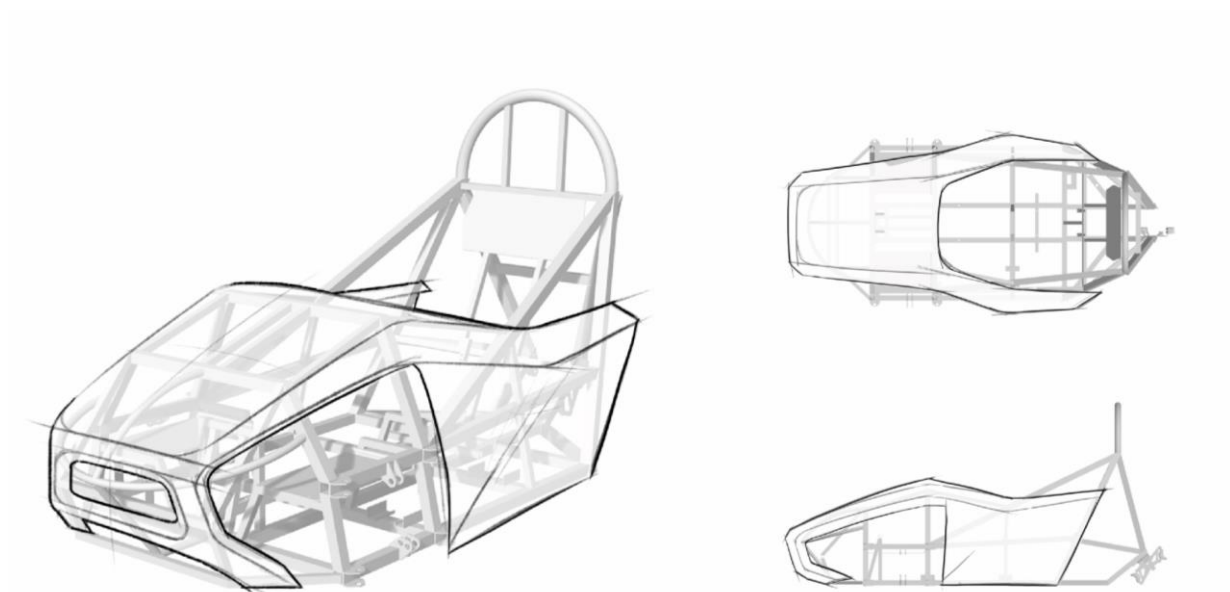


obr. 4-6 Skica druhého variantního řešení



obr. 4-7 Ohybový vzor pro druhou variantu: okraje – zeleně, hory – červeně, údolí – modře.

4.2.3 Varianta 3



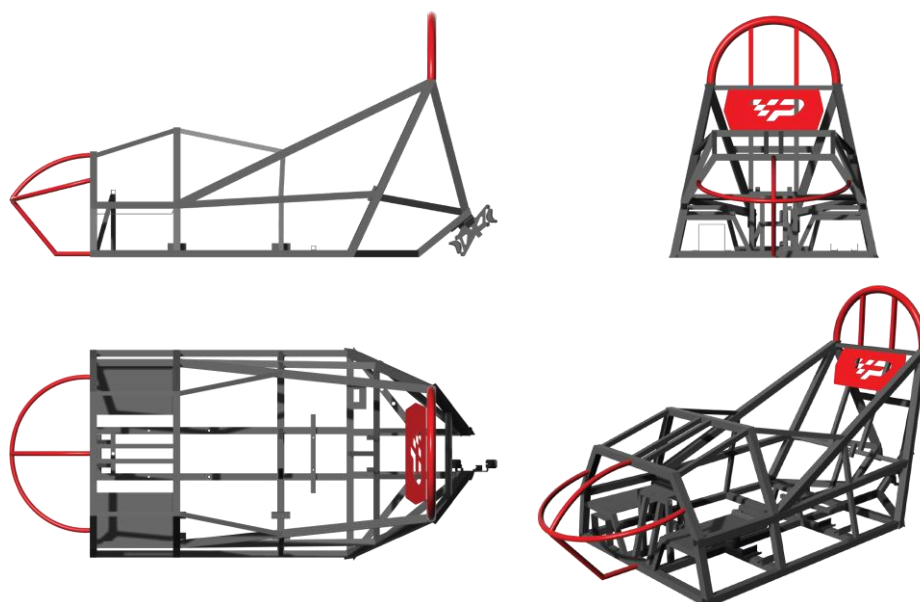
obr. 4-8 Skica třetího variantního řešení

Třetí variantní studie je inspirována monoposty formule 1 z 50. a 60. let minulého století. To se projevuje zejména v přední části karoserie, která se uzavírá v charakteristický oblý tvar. Podobně jako u druhého variantního řešení tvoří přední díl karoserie rám, který objímá celý monopost. Na ten se váže kapota a boční díly karoserie.

5 TVAROVÉ ŘEŠENÍ

5.1 Tvar a kompozice

Výsledné tvarové řešení vychází z existující konstrukce pneumobilu a při navrhování byl kladen důraz na soulad mezi rámem a karoserií. Se členy studentského týmu Pneumobil Racing Team Brno byly prodiskutovány možné kosmetické úpravy podvozku, které by mohly pomoci tvarově sjednotit rám s karoserií. Povolené úpravy jsou vyznačeny červeně na **obr. 5-1**. V přední části se jedná o konstrukci, která slouží jako opora pro současně využívanou karoserii. Tuto část lze v případě potřeby odstranit, nebo upravit. V zadní části se jedná o plechovou opěrku hlavy, kterou je možné bez větších obtíží odstranit, a o půlkruhovou ochranu hlavy, kterou vyžadují pravidla. Tu lze v případě potřeby tvarově upravit při zachování výšky ochrany.



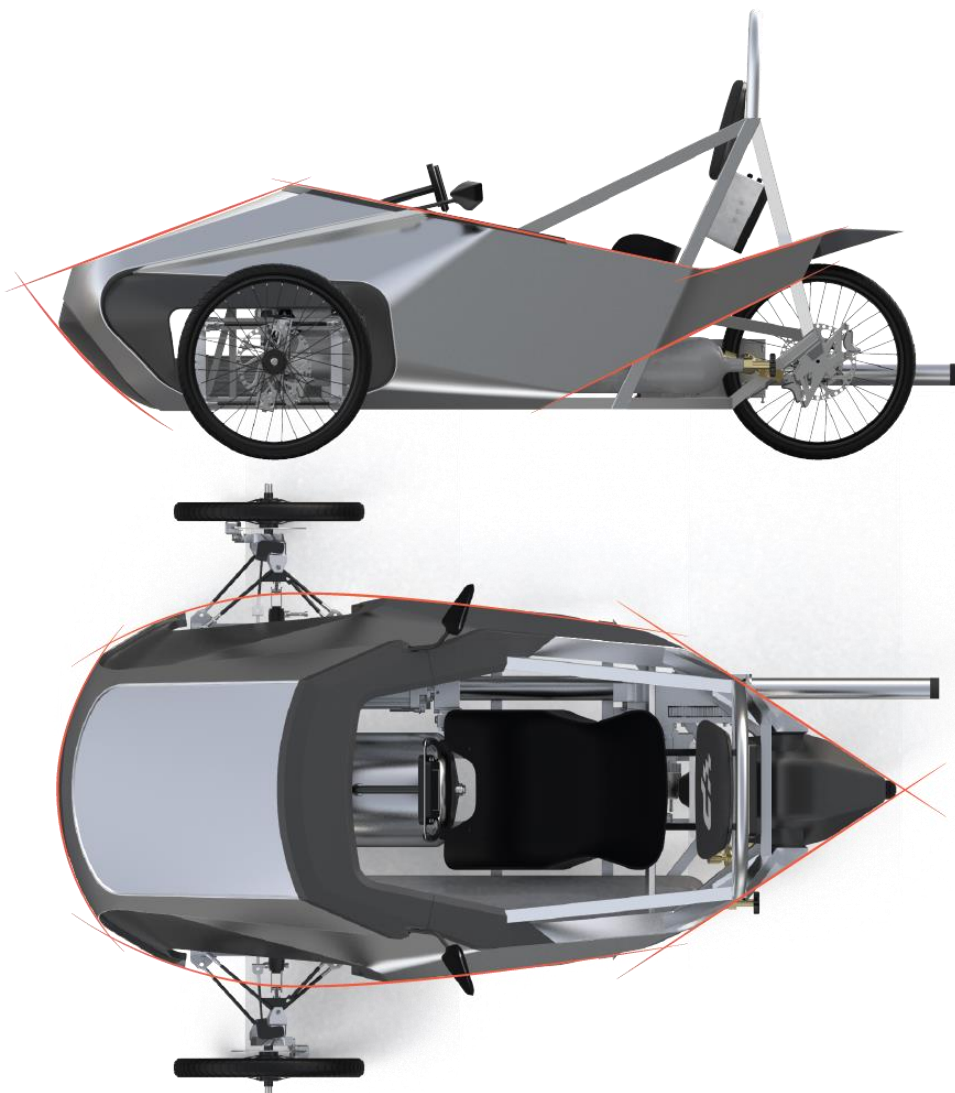
obr. 5-1 Rám pneumobilu Javelin

Při výběru finální varianty byl kladen důraz na funkci závodního monopostu jako takového, dynamiku a ucelenost návrhu, ergonomické požadavky řidiče či dostatečně jednoduchý servisní přístup k vnitřním komponentům vozidla. Tyto parametry nejlépe splnila druhá variantní studie společně se zapracováním některých myšlenek z variantní studie třetí. Oproti koncepčním návrhům došlo ke zpřesnění návrhu s ohledem na estetické, funkční a výrobní aspekty. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto doplnit díly určené pro výrobu ohýbáním díly vyráběnými konvenčním způsobem.



obr. 5-2 Finální tvarové řešení

Z bočního pohledu působí tvarování karoserie dynamicky. Přední část vozidla je definována dvěma sbíhajícími se křivkami, které spolu svírají ostrý úhel. Zatímco spodní křivka navazuje na podvozek konstrukce a uzavírá tvar v dolní části, horní křivka kopíruje vrchní hranici rámu až po kokpit. Zde se hranice láme a přechází v klesající charakter a karoserie tento směr kopíruje až do zadní části, kde je konstrukce protnuta profilem, který ukončuje kokpit. Tady karoserie přechází v subtilnější tvar volně přecházející v blatník. V půdorysu tvar karoserie volně vychází z tvaru kapky – oblé tvarování v přední části se směrem dozadu mírně rozšiřuje a objímá konstrukci. Zhruba v jedné třetině vozidla se tento charakter obrací, karoserie se zužuje a plynule přechází až do blatníku v zadní části, který tvar uzavírá. Z předního pohledu je patrná snaha o optické zúžení přední části pneumobilu, čehož je dosaženo pomocí rozšíření karoserie směrem dozadu. Dominantním prvkem karoserie je plechový díl ve tvaru písmene „H“, který dává vozidlu charakteristický výraz.

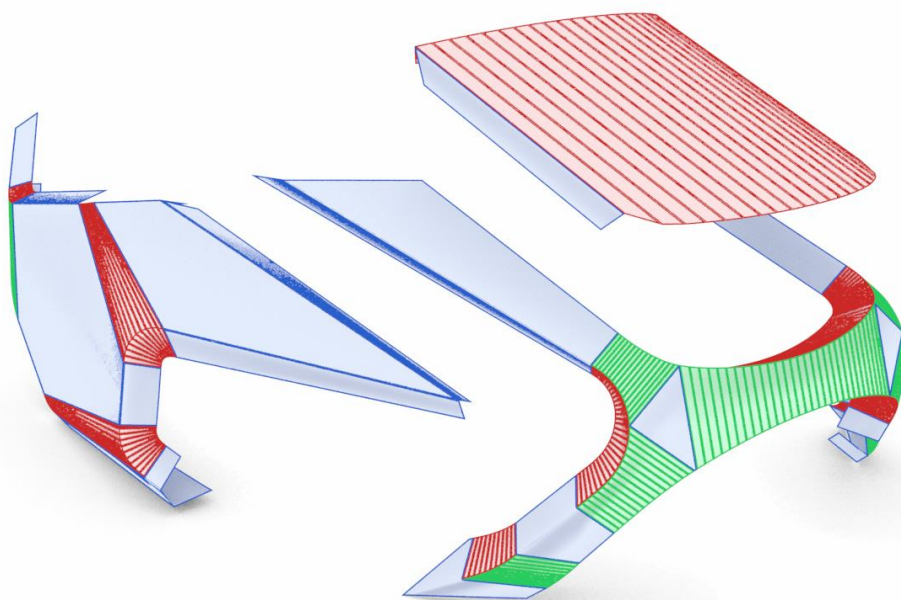


obr. 5-3 Kompoziční skici

5.2 Díly tvořené CCF geometrií

Karoserii tvoří čtyři díly určené pro výrobu ohýbáním z plátových materiálů. V přední části se jedná o rám kapoty ve tvaru písmene H, do kterého je s mírným odsazením vsazena samotná kapota. Ta je zakřivená v příčném směru a její horní okraj je zarovnan s horními okraji předního dílu. Zbývající dva díly kryjí boky monopostu a jsou slícovány s předním dílem s mírným odsazením, které přiznává členění karoserie. Tvarově opticky navazují na konstrukci rámu. Kuželová plocha volně navazuje na směr umístění přiznaného profilu lemujícího kokpit, válcová plocha tvořící přechod do blatníku kopíruje směr sklonu zadní části kokpitu. Ve spodní části jsou boční díly mírně zabaleny směrem do vozidla, což opticky napomáhá uzavření tvaru.

Každá CCF geometrie je složena ze základních rozvinutelných ploch, tedy válcové, kuželové, rovinné, či tangentní rozvinutelné. Tyto plochy na sebe navazují a tvoří plynulé přechody. Rozložení základních ploch v jednotlivých dílech je znázorněno na obr. 5-4. Jednotlivé typy ploch jsou od sebe pro přehlednost barevně odlišeny, kuželové plochy jsou znázorněny červeně, válcové zeleně a rovinné modře.



obr. 5-4 Tvarová analýza použité CCF geometrie

5.3 Díly pro konvenční způsob výroby

V zájmu tvarového sjednocení, konstrukčního zjednodušení a celistvosti návrhu jsou CCF geometrie doplněny díly, k jejichž výrobě budou použity tradiční metody. Tyto díly na několika místech doplňují a dotvářejí výsledný design karoserie.

V přední části je tvar uzavřen jednoduchým dílem, který vystupuje z roviny definované předním rámem kapoty. Tvar je vypouklý směrem ven a je rozdělen horizontální hranou, jejíž charakter jde proti hraně ohýbaného dílu, což dodává přední části vozu pozitivnější výraz. Hrana opticky navazuje na horizontální hranu výřezu pro zavěšení kola v bočním díle. Tento díl propojuje boční a přední ohýbané díly a zároveň uzavírá prostor kolem přední nápravy. Šířka dílu se směrem dozadu dynamicky zužuje. Dalším doplňujícím dílem je lemování kokpitu. Ten kopíruje konstrukci a propojuje přední CCF díl s kapotou. Ve směru hrany, ve které se stýkají přední a boční ohýbané díly, vychází z lemování zpětná zrcátka. Zadní kolo je kryto blatníkem, který je vsazen do rámu a tvarem navazuje na ukončené boky karoserie.



obr. 5-5 Detail přední části karoserie



obr. 5-6 Detail kokpitu



obr. 5-7 Detail blatníku

5.4 Úpravy konstrukce pneumobilu

Úpravy rámu pneumobilu byly navrženy v souladu s povolenými úpravami (viz **obr. 5-1**) za účelem dosažení lepšího tvarového souladu s karoserií a na základě zlepšení ergonomických parametrů vozidla. Konkrétně se jedná o demontáž přední části konstrukce, úpravu ochrany hlavy a návrh nové opěrky hlavy. Půlkruhový ochranný trubkový oblouk byl nahrazen hranatějším tvarem opakujícím motiv objevující se v přední části karoserie a lépe korespondující s jejím tvarovým řešením. Strohá plechová opěrka byla nahrazena polstrovanou, která bude lépe plnit ergonomické požadavky. Opěrka tvarově koresponduje s ochranným rámem.



obr. 5-8 Hlavová opěrka

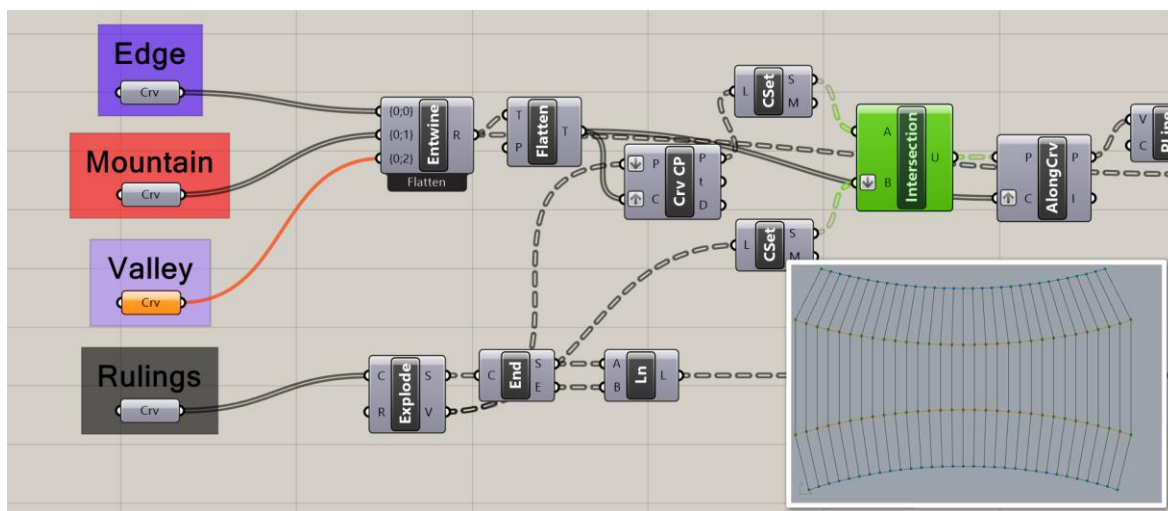
6 KONSTRUKČNĚ TECHNOLOGICKÉ A ERGONOMICKÉ ŘEŠENÍ

6.1 Konstrukčně technologické řešení

Velká část navrženého designu karoserie je určena pro výrobu poměrně novou a málo ověřenou technologií. To s sebou nese celou řadu problémů, které je třeba pro úspěšné splnění designérského úkolu vyřešit. Tato kapitola dále popisuje konstrukční aspekty navrženého řešení.

6.1.1 Simulace zakřivených ohybů

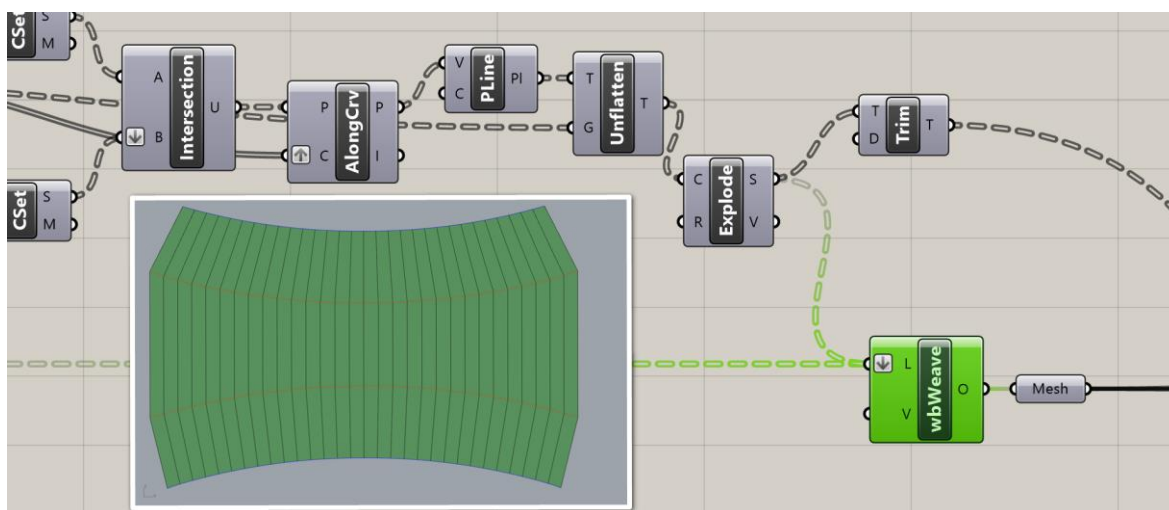
K simulaci ohýbání jednotlivých dílů karoserie byl použit zásuvný modul Grasshopper pro CAD software Rhinoceros. Využití tohoto pluginu je výhodné především proto, že se jedná o víceúčelový nástroj, který navíc pracuje v prostředí CAD softwaru. Je tedy možné okamžitě po simulaci ohybu vyhodnotit, nakolik odpovídá výchozímu plošnému modelu, či zda koresponduje s navazujícími prvky. Simulace aplikuje diskrétní geometrický přístup k popisu CCF geometrií, tedy zjednodušení tvaru na PQ mesh na základě polohy površek. Navržený algoritmus vychází z volně dostupných komponent, určených primárně pro simulaci prizmatického origami.



obr. 6-1 Třídění vstupní geometrie - 1. část

Vstupními daty pro simulaci je kompletní ohybový vzor složený z rovinných křivek. Ty můžeme rozdělit na čtyři skupiny: okraje, pohoří, údolí a površky. Zatímco ohybovými a okrajovými křivkami mohou být jakékoli křivky či přímky, površky mohou být definovány pouze úsečkami, případně lomenými čarami, což logicky vyplývá z jejich geometrické podstaty. Připravený ohybový vzor je vložen do GH definice, jejíž výstupem je PQ mesh, která simuluje zakřivený ohyb. Úhel ohybu je kontrolován uživatelem.

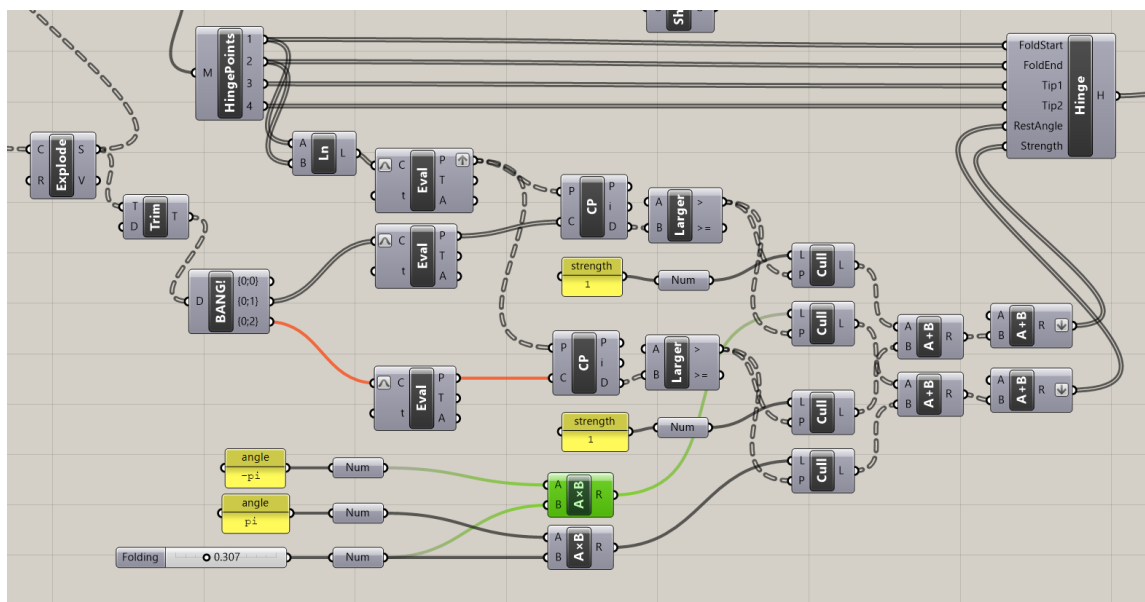
Navržený skript nejprve vstupní křivky roztrídí a rozdělí na rovné segmenty. Toho je dosaženo na základě průsečíků okrajových a ohybových křivek s površkami, které není třeba nijak výrazně zpracovávat. Jediným krokem, kterým procházejí je funkce *Explode*, jenž rozbíjí lomené čáry na úsečky. Druhým výstupem komponenty jsou koncové body úseček. Ty jsou zároveň průsečíky površek a ohybových a okrajových křivek a slouží jako výchozí body pro vytvoření rovných segmentů zastupujících v simulaci křivky. Nejprve je však třeba je uspořádat podél křivek.



obr. 6-2 Třídění vstupní geometrie - 2. část

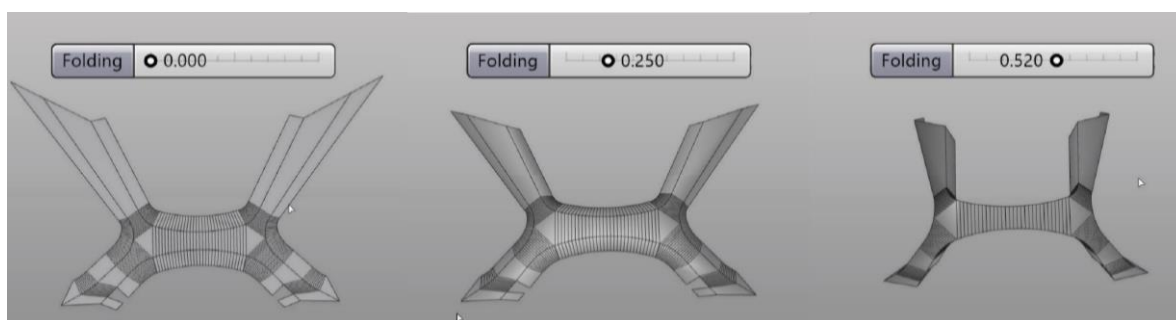
Prvním krokem je komponenta *Curve Closest Point* (*Crv CP*), která k bodu v prostoru hledá jeho nejbližší bod na křivce. Vstupem pro tuto komponentu jsou koncové body površek a vstupní ohybové a okrajové křivky, které byly zpracovány komponentami *Entwine* a *Flatten*, což v dalších krocích usnadní jejich třídění. Výstupem komponenty *Curve Closest Point* jsou body, které leží na vstupních křivkách. Z množiny těchto bodů je následně vytvořen průnik s množinou koncových bodů površek pomocí komponenty *Set Intersection*. Při této sérii kroků dostáváme množinu bodů, která je uspořádána do datových stromů stejných jako ohybové a okrajové křivky. Před vytvořením lomené čáry z těchto bodů je třeba je nejprve uspořádat podél křivek, a to díky funkci *Sort Along Curve*.

Další část definice je orientována na simulaci ohybu PQ meshe a vychází z komponenty Origami vytvořené Danielelem Pikerem. Původní komponenta pracovala s fyzikálním enginem Kangaroo 1, pro dosažení lepších výsledků však byla přepracována na fyzikální engine Kangaroo 2. Ten v Grasshopperu reprezentuje komponenta *Solver*, jejímž hlavním vstupem jsou Goal Objects, tedy cílové objekty. Pod tímto pojmem si můžeme představit soubor těles a sil, které na tyto tělesa působí. Tělesa jsou reprezentována geometrií, pro síly nabízí Kangaroo speciální komponenty. Pro simulaci ohýbání jsou potřebné následující silové komponenty: *Planarize*, *Lenght (line)* a *Hinge*. První jmenovaná udržuje jednotlivé čtyřúhelníkové stěny PQ meshe během simulace planární. Komponenta *Lenght (line)* definuje odolnost hran meshe vůči prodloužení. To je pro simulaci ohybů nežádoucí, proto tato komponenta udržuje jednotnou délku hran v průběhu ohýbání. Poslední silová komponenta je pro ohýbání klíčová, určuje totiž síly zodpovědné za ohyb meshe. Vstupem pro tuto komponentu jsou 4 body, dva definují ohybovou linii a dva tvoří páku.



obr. 6-4 Simulace zakřiveného ohýbání - 2. část

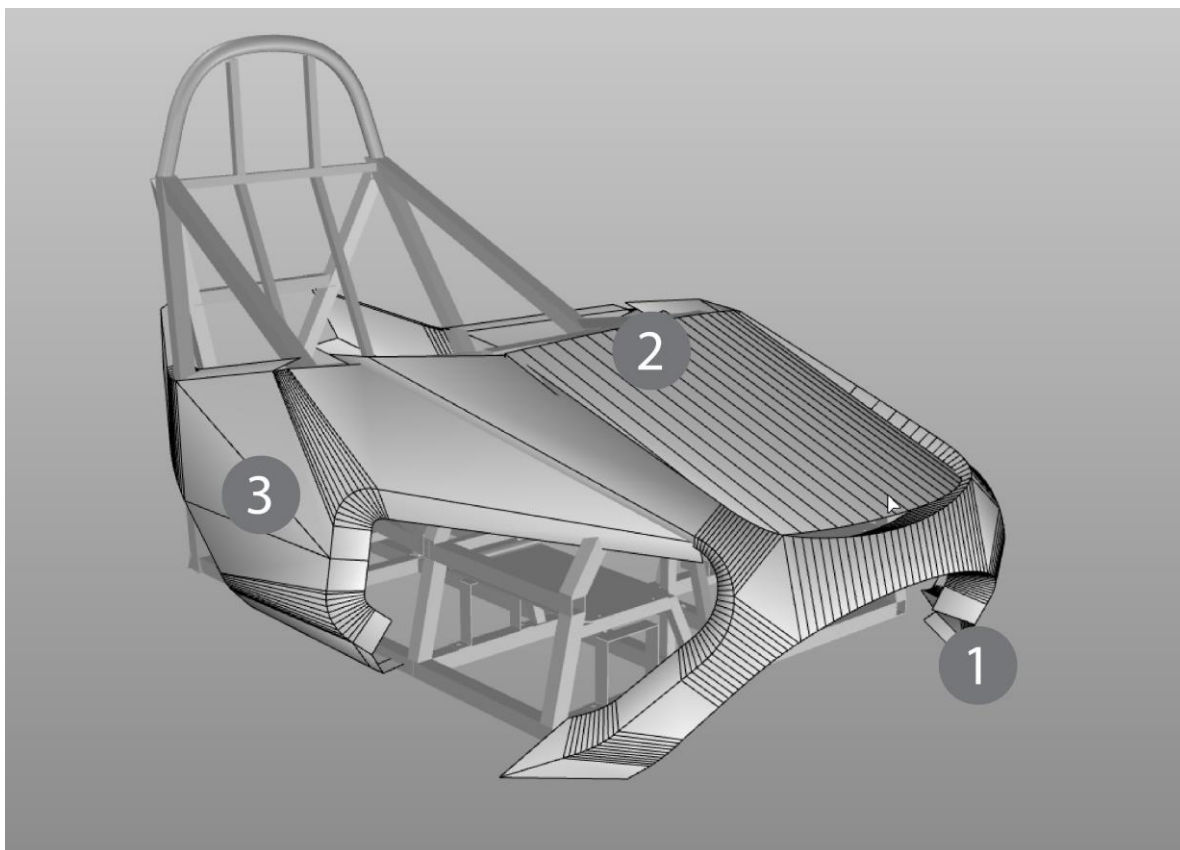
Zdrojové body pro komponentu *Hinge* jsou získány pomocí komponenty *HingePoints*, jejímž vstupem je triangulovaná mesh, která vznikla z původní PQ meshe díky komponentě *Triangulate*. *HingePoints* extrahuje z meshe vrcholy, které následně uspořádá do 4 výstupů tak, aby každá hrana triangulované meshe byla komponentou *Hinge* brána jako ohybová. Pomocí algoritmu, jehož vstupními daty jsou ohybové křivky složené z rovných segmentů, jsou separovány pouze požadované ohybové hrany. Druhým vstupem do tohoto algoritmu je komponenta *NumberSlider*, díky které uživatel získává kontrolu nad ohybovým úhlem.



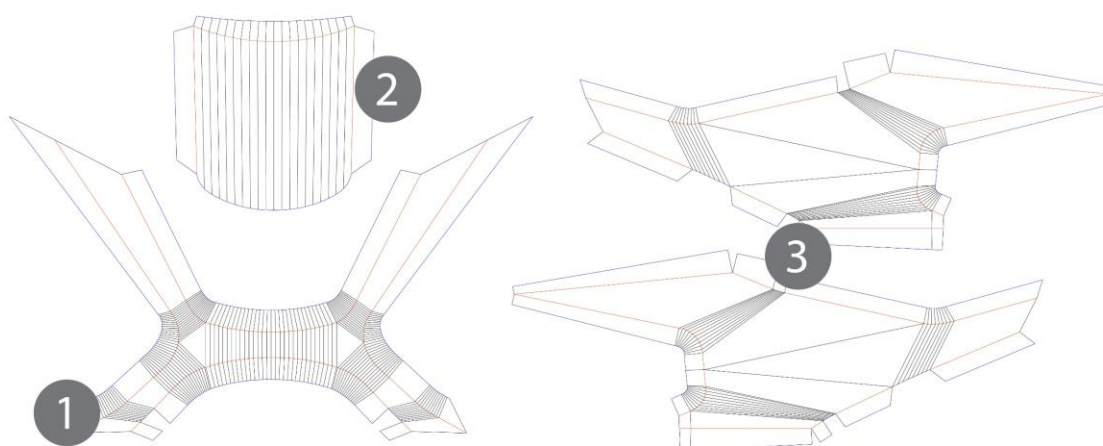
obr. 6-5 Simulace zakřiveného ohýbání - 2. část

Využití ohybového skriptu v návrhu

Nasimulování ohýbání jednotlivých dílů značně napomohlo k vytvoření přesných ohybových vzorů, jenž jsou výchozím prvkem pro výrobu karoserie. Další předpokládanou funkcí simulace je podpora při vytváření trajektorií robotických ramen, které budou jednotlivé díly vyrábět. Význam skriptu při navrhování je nastíněn v kapitole 4.1.1.



obr. 6-6 Simulovaný model karoserie

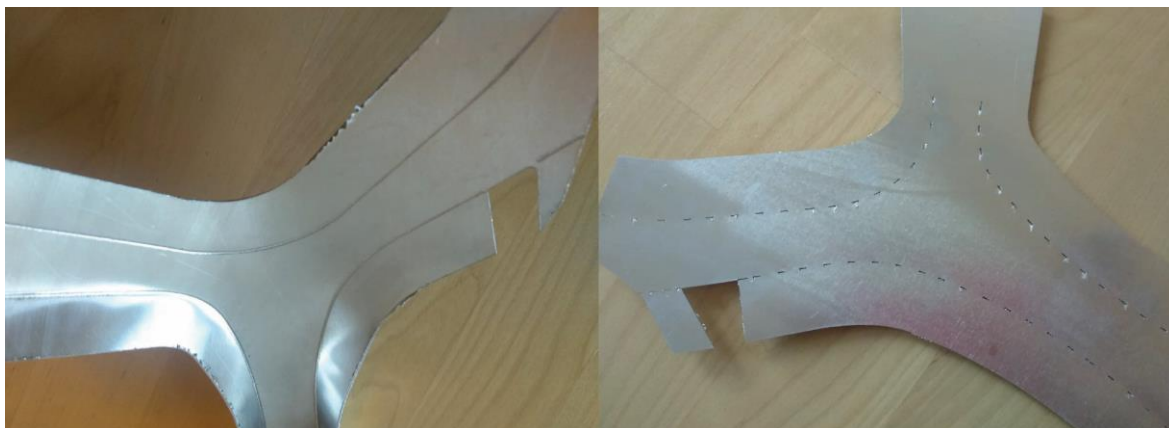


obr. 6-7 Ohybové vzory jednotlivých dílů

6.1.2 Robotická výroba

Karoserie je určena k výrobě prostřednictvím metody pro ohýbání plátových materiálů pomocí odpojitelných zařízení, kterou vyvinula a úspěšně praktikuje britská společnost RoboFold. Její know-how však není veřejně dostupné a spojení s firmou se bohužel nepodařilo navázat.

Tvarově jsou jednotlivé díly definovány ohybovým vzorem a úhly, do kterých je vzor ohnut. Přesnost a vyrobiteľnosť navrhovaných dílů byla ověřena nejen prostřednictvím simulace, ale i pomocí zmenšených fyzických prototypů. V rámci prototypů byly testovány různé technologické varianty narušení ohybové linie, konkrétně vyfrézování drážky do hloubky jedné poloviny tloušťky materiálu pomocí tříosé CNC frézky a parciální prořezání ohybové křivky pomocí laseru (viz **obr. 6-8**). Konkrétně byly do plechu laserem vypáleny křivkové segmenty o délce 2 mm s 5mm rozestupy. Pro vyřezání drážky druhou metodou byla zvolena kulová fréza o průměru 2 mm. Obě technologie byly testovány na stejném materiálu, tedy hliníkovém plechu tloušťky 0.5 mm na prototypoch v měřítku 1:4.



obr. 6-8 Varianty narušení ohybové linie

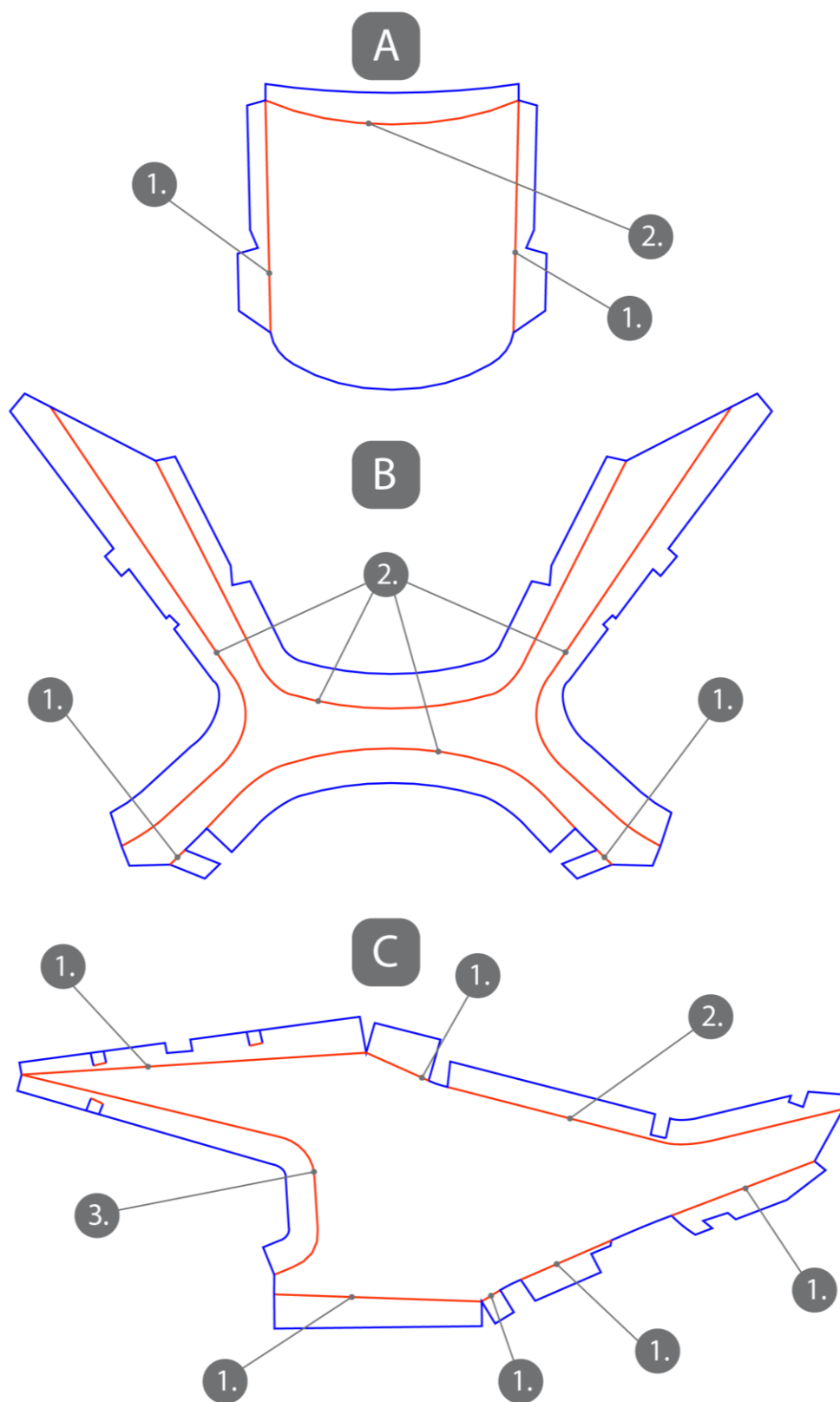
Z **obr. 6-9** je patrné, že se pomocí obou výše zmíněných metod podařilo přesně definovat ohybovou křivku. Dosažené výsledky jsou tedy srovnatelné, a obě technologie je možné využít pro naznačení ohybových vzorů pro zakřivené ohýbání.



obr. 6-9 Porovnání výsledků ohýbání podél křivky narušené

Při ručním ohýbání prototypů bylo stanoveno vhodné pořadí ohýbání jednotlivých ohybů pro každý díl; některé ohyby je nutné provádět synchronizovaně s jinými pro dosažení správného výsledku. Do finálních ohybových vzorů byly přidány konstrukční výřezy sloužící k připasování na rám. Navržené pořadí jednotlivých ohybů je znázorněno na **obr. 6-10**. V případě, že se ve vzoru nachází rovné segmenty, které nenavazují na zakřivené ohyby, je vhodné jimi začít, protože udržují požadované zakřivení materiálu při následném ohybu podél křivek. Synchronizované ohýbání je třeba dodržet při výrobě ohybového vzoru B, tedy předního dílu kapoty.

V další fázi přípravy výroby je třeba připravit vhodné umístění připojovacích zařízení a navrhnout vhodné trajektorie pro robotická ramena. Tato fáze však vyžaduje další prototypování a experimenty zahrnující využití průmyslového robota. Toho v rámci této práce bohužel nebylo dosaženo. Na vině jsou do jisté míry časové důvody, ale také fakt, že v rámci Ústavu konstruování existuje pracoviště disponující pouze jedním robotickým ramenem, přičemž k ohýbání plátových materiálů je třeba alespoň dvou těchto zařízení.



obr. 6-10 Finální ohybové vzory s navrženým pořadím ohýbání

6.1.3 Materiály

Při výběru materiálu byl kladen důraz zejména na klíčovou vlastnost závodního monopostu – hmotnost. Pro ohýbané části karoserie byl z tohoto důvodu zvolen hliníkový plech EN AW 1050A H24. Pomocí prototypů bylo oběřeno, že je tento plech k ohýbání vhodný. Při volbě materiálu je však důležitým faktorem také zvolená technologie narušení ohybové linie. Pro narušení laserovým paprskem není materiál příliš důležitý, v případě použití CNC frézy je však vhodné volit lépe obrobitelný materiál. Vhodnou alternativou může být slitina EN AW 5083.

K dosažení co nejvyšší úspory váhy toto řešení počítá s použitím plechu o tloušťce 0,5 mm. Jedná se o tenký a měkký plech, nicméně se předpokládá zvýšení tuhosti jednotlivých dílů díky vytvořeným ohybům. Dá se také uvažovat o vyztužení exponovaných míst karoserie prostřednictvím lokálního vyztužení uhlíkovým laminátem.

Pro ostatní díly je zamýšlenou výrobní technologií laminování, použitými materiály tedy bude uhlíkové vlákno a epoxidová pryskyřice. Takto vzniklý kompozit se vyznačuje vysokou pevností i při použití relativně nízkého množství vrstev. Zároveň si zachovává nízkou hmotnost. Díky těmto vlastnostem se používá například ve sportovních automobilech.

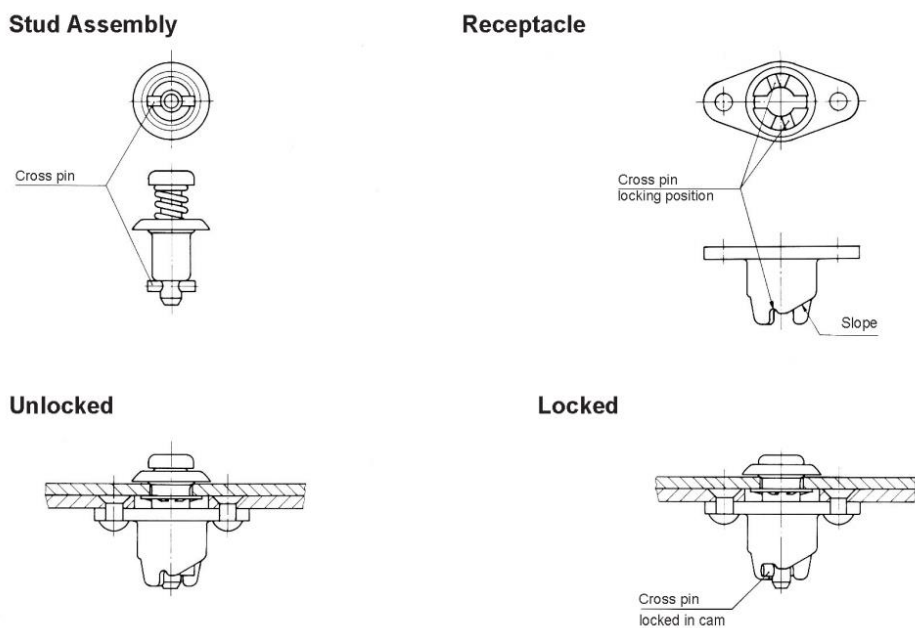
6.1.4 Uchycení karoserie

Pro spojení jednotlivých dílů karoserie a jejich připevnění k šasi jsou uvažovány tři typy spojů. Prvním z nich jsou nerozebíratelné spoje, které jsou využity ke kompletaci dílů, jež není třeba rozebírat a tvoří celky. Příkladem je přední část kapoty, tedy přední laminátový díl, dva plechové díly kapoty a vrchní část laminátového límce. Tam, kde je to možné, jsou spoje ukryty z vnitřní strany karoserie, například je využito přehnutých částí obou plechových dílů, které na sebe lícují. Nerozebíratelné spoje jsou představovány nýty.



obr. 6-11 Servisní přístup

Servis vozidla je umožněn odejmutím bočních laminátových krytů závěsu kol a následně celé přední části karoserie (**obr. 6-11**). Pro uchycení těchto dílů je uvažován druhý typ spojů - čtvrtotočkové rychloupínky, jejichž zajištění a odjištění je rychlejší než při použití šroubů. To umožňuje šetřit drahocenný čas v případě potřeby rychlé opravy závady, ke které může neočekávaně dojít během závodu. Jedna z možností konstrukce rychloupínky a její princip je znázorněn na **obr. 6-12**.



obr. 6-12 Princip čtvrtotočkové rychloupínky [32]

Laminátové krytování kolem závěsu kola je vsazeno horní částí do výřezu v bočním dílu karoserie. Drží tedy v tvarovém zámku, ve kterém je zajištěno pomocí dvou rychloupínek. Jedna z těchto upínek fixuje krytování k bočnímu plechovému dílu karoserie, druhá k přední části kapoty. Přední část je taktéž uchycena rychloupínkami, konkrétně k rámu skrz laminátový límec v horní části, a skrz přední laminátový kryt ve spodní části (**obr. 6-13**).

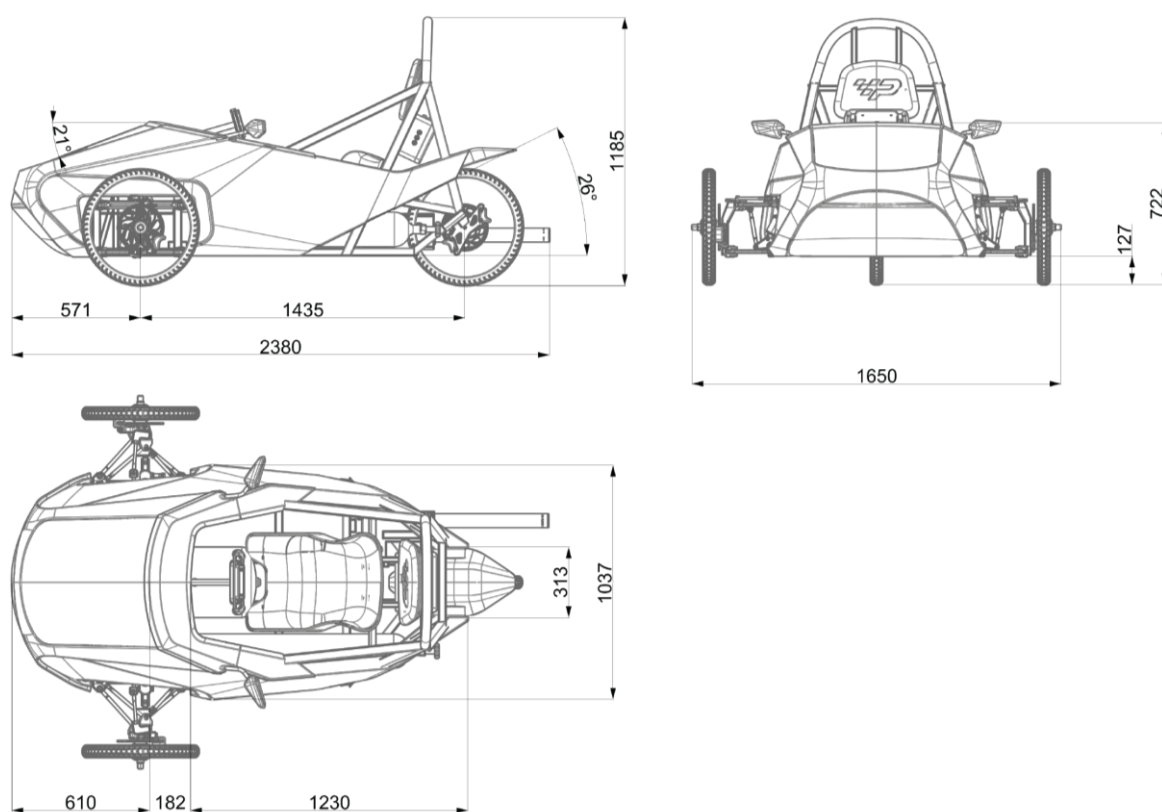
Boční díly karoserie jsou připevněny ke konstrukci pomocí šroubů, stejně jako zadní blatník, který je vsazen do rámu a přišroubován. U těchto dílů se nepředpokládá nijak častá demontáž.



obr. 6-13 Uvažované rozmístění spojovacích prvků

6.1.5 Rozměry

Rozměry karoserie jsou závislé na rozměrech šasí. Základní rozměry pneumobilu v milimetrech jsou 2380 mm x 1185 mm x 1650 mm. Ostatní rozměry jsou znázorněny na **obr. 6-14**. Velmi důležitým parametrem je také hmotnost vozidla, která byla odhadnuta na základě použitých materiálů. Předpokládaná váha plechových dílů je 3,33 kg, hmotnost karbonových dílů pak 1,67 kg. Celková hmotnost karoserie tedy bude činit asi 5 kg.



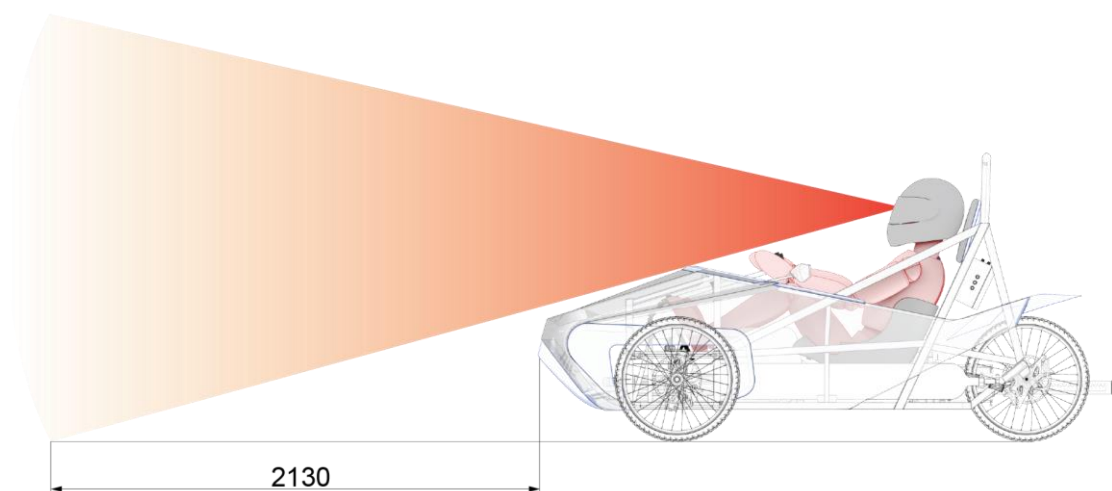
obr. 6-14 Rozměrové řešení vozidla

6.2 Ergonomické řešení

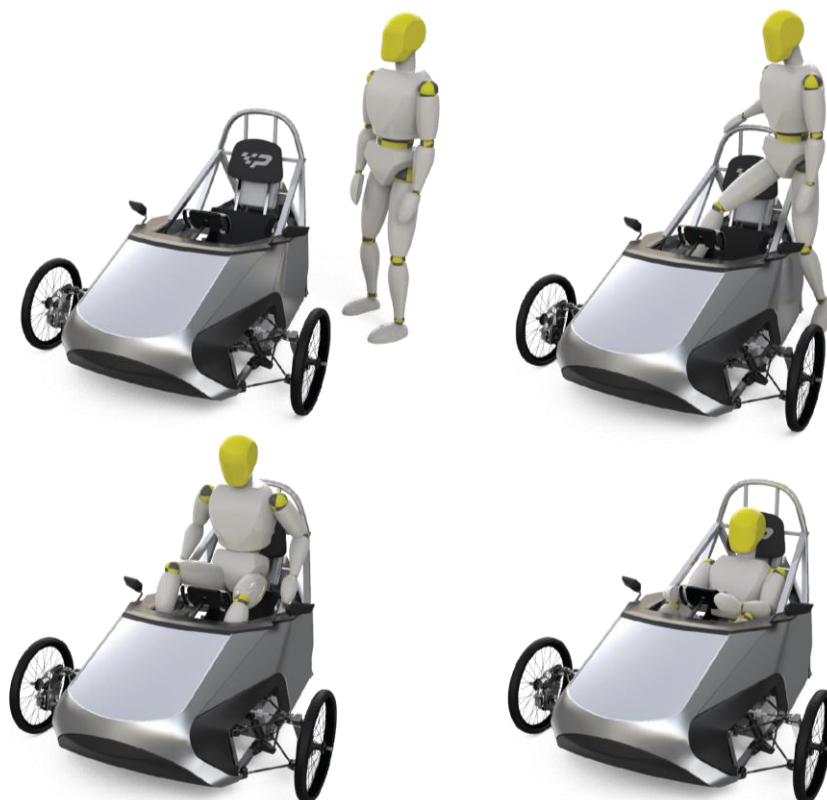
Ergonomické řešení pneumobilu Javelin trpí celou řadou nedostatků. V rámci této práce však nebylo možné některé z nich vyřešit, neboť plynou ze samotné konstrukce podvozku, tudíž by jejich řešení vyžadovalo výrazný zásah do rámu. Zásadním problémem je nevhodný posed ve vozidle s pokrčenými končetinami, který je způsoben nedostatkem místa uvnitř konstrukce. Ergonomie sezení je alespoň částečně vylepšena přepracováním hlavové opěrky, která je v původním řešení nevhodně řešena rovným kusem plechu.

Návrh karoserie klade důraz na umožnění jednoduchého nástupu do vozidla. Toho je dosaženo odhalením hranolové konstrukce vozidla v zadní části. Při nástupu řidič překročí rám jednou nohou, přičemž se drží ochranného oblouku. Poté se vzepré na rukou o rám vozidla a následně se spustí do sedačky (**obr. 6-16**).

Výhledové zorné úhly z vozidla jsou téměř shodné s původním řešením.



obr. 6-15 Výhled z vozidla



obr. 6-16 Nástup do vozidla

7 BAREVNÉ A GRAFICKÉ ŘEŠENÍ

7.1 Barevné řešení

Základní barevné řešení v rámci snížení výrobních nákladů nepočítá s povrchovou úpravou, přiznává tedy použité materiály a jejich přirozené barevné vlastnosti. Díky tomu je dosaženo zdůraznění použité technologie a zároveň karoserie působí jednoduchým elegantním dojmem. Kombinace stříbrné barvy hliníku a černého uhlíkového kompozitu navíc koresponduje s přiznanou konstrukcí vozidla. Tato barevná kombinace je doplněna černými polepy logotypů sponzorujících firem a startovními čísly.



obr. 7-1 Základní barevné řešení

Pro druhou barevnou variantu byla jako základ zvolena modrá barva, která je zároveň barvou studentského týmu Pneumobil Racing Team Brno. Ta byla použita na kapotu a boční plechové díly karoserie. Přední díl ve tvaru písmene „H“ je ponechán v přirozené barvě hliníku, což kontrastuje s tmavými barvami zbytku karoserie a zdůrazňuje hlavní charakteristický prvek monopostu.



obr. 7-2 Barevné řešení v barvách Pneumobil Racing Team Brno

Třetí barevná varianta klade důraz na účel vozidla, kterým je reprezentace univerzity na mezinárodní soutěži. Z tohoto důvodu byla zvolena červená barva symbolizující VUT v Brně. Stejně jako předchozí varianta je i u této charakteristický přední díl ponechán bez povrchové úpravy. Barevné řešení je doplněno bílými polepy, které jsou na rudé barvě dostatečně kontrastní.



obr. 7-3 Barevné řešení v barvách VUT

7.2 Grafické řešení

Grafické řešení spočívá v rozmístění grafických prvků, kterými jsou loga sponzorujících firem a startovní čísla. Vychází z již zavedeného uspořádání informací na kapotě pneumobilu, tedy umístění startovního čísla na horní část kapoty a na levém boku vozidla. Na pravé straně karoserie jsou pak uspořádány logotypy sponzorujících firem. Grafika napomáhá rozčlenění velkých rovných bočních ploch a zároveň je dobře viditelná. Logo Pneumobil Racing Teamu Brno je vyšito na hlavové opěrce vozidla.



obr. 7-4 Grafické řešení návrhu

8 DISKUZE

8.1 Psychologické aspekty

Design by měl od prvního seznámení s produktem naznačovat svoji funkci. Toho je dosahováno vhodně zvoleným tvaroslovím, barevností či kompozicí, tedy vlastnostmi, které pozorovatel registruje okamžitě při seznámení s produktem. V případě závodního vozidla by měla být na první zřejmá dynamika a dravost, které uživateli či pozorovateli navodí pocit rychlosti. Přestože pneumobil nevyniká extrémní rychlostí, měly by tyto aspekty být patrné. Zvolená netradiční technologie dodává designu karoserie charakteristické originální vzezření, což napomáhá zapamatovatelnosti a navozuje pocit výjimečnosti.

8.2 Ekonomické aspekty

Technologie robotického ohýbání výrazně snižuje cenu výroby karoserie, což plyne jak z absence nutnosti výroby celoplošné formy, tak i z ceny použitého materiálu. Další výhodou je také snížení času samotné výroby. Nutnost výroby forem však není potlačena úplně, jsou totiž nezbytné pro zhotovení doplňkových laminátových dílů karoserie. Oproti současným řešením jsou však tyto díly menší, z čehož plyne nižší spotřeba materiálu jak na formy, tak na samotné laminování.

Předpokládaná cena hliníkového plechu potřebného pro výrobu karoserie je asi 1 500 Kč, odhadovaná cena materiálu pro výrobu laminovaných dílů, tedy uhlíkového vlákna, epoxidové pryskyřice, extrudovaného polystyrenu pro výrobu forem a brusiva, je 5 000 až 6 000 Kč. V odhadovaných nákladech není zahrnuta cena samotné výroby, předpokládá se totiž, že zhotovení provedou samotní studenti s využitím zázemí, které mají k dispozici. Cena barevného řešení taktéž není zohledněna vzhledem k faktu, že není nezbytně nutná.

8.3 Sociální funkce

Pneumobil Racing Team Brno se svými monoposty reprezentuje VUT a Českou republiku účastí na mezinárodní soutěži a dále prezentuje výsledky vývoje svých pneumobilů na veletrzích a jiných akcích. Využití nových technologií v tomto případě zcela koresponduje s myšlenkou těchto akcí.

8.3.1 Ekologie

Výrobou karoserie ohýbáním hliníkového plechu jsou eliminovány formy, veškerým odpadním materiálem jsou v tomto případě odštěpky a zbytky. Ty je možné poměrně jednoduše recyklovat. Problémem stále zůstává odpadní materiál při výrobě laminátových dílů, ten se ale podařilo do jisté míry zredukovat díky omezenému použití této technologie v návrhu.

8.4 Srovnání navrženého řešení se současnou metodou

Pro správné vyhodnocení využitelnosti navrženého řešení v praxi je třeba porovnat dosažené výsledky s předchozími realizovanými karoseriemi. Výchozími parametry pro komparaci byla zvolena hmotnost karoserie, která je v případě pneumobilu klíčová, a ekonomické aspekty, tedy náklady a čas výroby. V nákladech je zahrnut veškerý potřebný materiál na výrobu laminovacích forem, epoxidová pryskyřice, lepidla a brusný materiál. Vzhledem k tomu, že laminování prováděli sami studenti, cena práce zde započítána není. Stejně tak není zahrnuta cena pracovních hodin robota při frézování forem. V nákladech na výrobu karoserie pomocí metody robotického ohýbání figuruje cena hliníkových plechů a cena materiálu potřebného k laminování doplňkových dílů. Výsledky tohoto srovnání jsou pro přehlednost uspořádány v tab. 8-1.

	Pneumobil Javelin	Pneumobil Falcon	Navržené řešení
Hmotnost	3,17 kg	4,36 kg	5 kg
Náklady	17 000 Kč	30 000 Kč	6 000 Kč – 7000 Kč
Čas výroby (dny)	7	20	5-6

tab. 8-1 Srovnání navrženého řešení se současnými monoposty Pneumobil Racing Teamu Brno [31]

Srovnání dokazuje přínosy aplikace metody robotického ohýbání plátových materiálů v rámci snížení výrobních nákladů i předpokládaného času výroby karoserie. Zmiňované benefity s sebou však nesou také nežádoucí nárůst hmotnosti karoserie. Hmotnostní rozdíl mezi původní karoserií a navrženým řešením činí necelé 2 kg, ve srovnání s karoserií pneumobilu Falcon se jedná o necelých 700 g.

Hmotnostní rozdíl mezi laminovanými karoseriemi je způsoben použitým počtem vrstev uhlíkových vláken. Karoserie staršího Javelinu byla laminována pouze dvěma vrstvami, což vyústilo v její nízkou hmotnost, ovšem za cenu nižší pevnosti. Proto bylo při pozdější výrobě karoserie Falconu rozhodnuto přidat o vrstvu navíc. Rozdíl ve hmotnosti mezi Falconem a navrhovaným řešením se tedy dá považovat za relevantnější. [31]

Rozdíly můžeme pozorovat i v nákladech na výrobu existujících karoserií. Ty jsou částečně způsobeny vyšší spotřebou materiálu v případě Falconu, a zároveň rozdílnými technologickými postupy. Výroba karoserie Javelinu probíhala prostřednictvím tzv. kopyta, tedy pozitivní formy. Díky tomu bylo spotřebováno méně materiálu k výrobě formy a samotné laminování trvalo kratší dobu, nicméně nevýhodou této metody je horší povrch. Na druhé straně ke zhotovení Falconu byly využity negativní formy, což vedlo ke zvýšení nákladů a času výroby, ale současně také k dosažení kvalitnějšího výsledku. [31]

Na základě tohoto srovnání lze říci, že metoda robotického ohýbání má potenciál k využití pro výrobu karoserie pneumobilu. Rozdíl ve hmotnosti karoserie není tak dramatický, náklady na výrobu se naproti tomu povedlo značně zredukovat. Rozhodujícím faktorem pro využití této technologie zůstávají preference studentského týmu. Vzhledem k faktu, že robotická ramena nejsou pro výrobu karoserie nezbytně nutná a karoserie by teoreticky mohla být vyrobena i ručně, mohlo by se jednat o vhodnou alternativu pro týmy, pro které je laminování příliš finančně náročné, popřípadě pro tuto technologii nemají dostatečné technické zázemí.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce navazuje na technologii vyvinutou londýnskou společností RoboFold, která se zabývá průmyslovou produkcí tvarů známých jako zakřivené ohýbání či CCF geometrie. Práce předkládá design karoserie závodního vozu týmu Pneumobil Racing Team Brno, s důrazem na návrhový postup s využitím CCF geometrie. Problémem navrhování s využitím CCF geometrie je dosud chybějící softwarový nástroj, který by zajišťoval vyrobiteľnost z plátových materiálů a zároveň napomáhal kreativnímu procesu, jehož cílem je dosáhnout vizuálních vlastností, proporcí a celkově potřebných kritérií z hlediska průmyslového designu.

Cíle práce stanovené ve 3. kapitole byly splněny. Na základě současných řešení byly identifikovány funkční a uživatelské nároky na karoserii, které byly použity jako výchozí body pro návrh designu. Konkrétně se jedná o dostatečný výhled z vozidla, snadný nástup a servisní přístup a co nejnížší hmotnost vozidla. Finální řešení vychází ze vstupních parametrů a tvarově koresponduje s účelem vozidla a jeho konstrukcí. Zároveň splňuje výrobní požadavky CCF geometrií.

Práce nabízí návrh metodického postupu pro řešení designérského úkolu tohoto typu. V rámci zjednodušení a zefektivnění navrhování CCF geometrie byl prostřednictvím zásuvného modulu Grasshopper vytvořen simulační nástroj, který umožňuje vytvářet a vyhodnocovat zakřivené ohyby přímo v digitálním prostoru. Oproti současným dostupným řešením nabízí navržený nástroj lepší kontrolu nad tvarem ohybů a není limitován pouze na jednoduché ohybové vzory.

Realizovatelnost a funkčnost navrženého designu a funkce simulačního nástroje byly v průběhu práce ověřovány prostřednictvím prototypování.

Klíčovým tématem diplomové práce je adaptace nové technologie tváření plátového materiálu bez nutnosti formy a využití jejího potenciálu v průmyslovém designu. Potenciální výhody nastíněné touto prací a komplexnost řešené problematiky činí téma vhodným pro další rozvoj v rámci projektů aplikovaného výzkumu či postgraduálního studia.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MARVANIA, Devang a Sudhakar SUBUDHI. A comprehensive review on compressed air powered engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **2017**(70), 1119-1130 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310681?via%3Dihub>
- [2] Pneumobil.hu. *Pneumobil.hu* [online]. Eger: Aventics Hungary Kft., 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://en.pneumobil.hu>
- [3] *Pneumobil Racing Team Brno* [online]. Brno: Pneumobil Racing Team Brno, 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://pneumobilteam.cz>
- [4] KOSCHITZ, Richard. *Computational Design with Curved Creases: David Huffman's Approach to Paperfolding* [online]. Cambridge, 2014 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/93013>. Disertace. Massachusetts Institute of Technology.
- [5] VERGAUWEN, Aline, Niels DE TEMMERMAN a Lars DE LAET. Digital modelling of deployable structures based on curved-line folding. *Proceedings of IASS Annual Symposia* [online]. Madrid: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2014, **2014** [cit. 2018-11-12]. ISSN ISSN 2518-6582. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [6] FUCHS, Dmitry a Serge TABACHNIKOV. More on Paperfolding. *The American Mathematical Monthly* [online]. 1999, **106**(1) [cit. 2018-11-12]. DOI: 10.2307/2589583. ISSN 00029890. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/2589583?origin=crossref>
- [7] BOOSHAN, Shajay. *Interactive Design of Curved-Crease-Folding* [online]. Bath, 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://opus.bath.ac.uk/48924/1/Manuscript.pdf>. Diplomová práce. University of Bath. Vedoucí práce Paul Sheperd, Paul Richens.
- [8] Airrari Szeged. *Facebook* [online]. Menlo Park (Kalifornie): Facebook, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/airrari.szeged/>
- [9] Gyalogkakukk Pneumobil. *Facebook* [online]. Menlo Park (Kalifornie): Facebook, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Gyalogkakukk-Pneumobil-101039806654390/>
- [10] Puffair - Pneumobil Team, Debrecen. *Facebook* [online]. Menlo Park (Kalifornie): Facebook, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Puffair-Pneumobil-Team-Debrecen-483984181712643/>
- [11] *Le Klint* [online]. Odense: Le Klint, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.leklint.com>

- [12] GALLINA, Eric. Bentley Taylor Made Concept by Kyungeun Ko. *Form Trends* [online]. Form Trends, 2018, 2012 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.formtrends.com/bentley-tailor-made-concept/>
- [13] GALLINA, Eric. Lexus LF-Zero by Jan Rosenthal. *Form Trends* [online]. Form Trends, 2018, 2012 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.formtrends.com/lexus-lf-zero-concept/>
- [14] *RoboFold* [online]. Londýn: RoboFold, 2013 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.robifold.com>
- [15] LEE, Ting-Uei, Zhong YOU a Joseph M. GATTAS. Elastica surface generation of curved-crease origami. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2018, **136-137**(136-137), 13-27 [cit. 2018-04-30]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.11.029. ISSN 00207683. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768317305334>
- [16] ORI-REF: A Design Tool for Curved Origami based on Reflection. *Jun Mitani* [online]. Tsukuba City: Jun Mitani, 2018, 2011 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/ori_ref/
- [17] Into the fold. *Develop3D: Technology for the product lifecycle* [online]. Londýn: X3D Media, 2018, 12-5-2014 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.develop3d.com/features/Robofold-into-the-fold>
- [18] KingKong. *Grasshopper: Algorithmic modeling for Rhino* [online]. Scott Davidson, 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.grasshopper3d.com/group/kingkong>
- [19] LOUTH, Henry. CCF fabrication techniques. *Henry David Louth* [online]. London: Henry David Louth, 2018 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: http://www.henrydavidlouth.com/ccd_fabrication_techniques/
- [20] Hliník a jeho slitiny. *Alfun: Metal Service Center* [online]. Bruntál: Alfun, 2018 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/o-hliniku>
- [21] Polyester PETG-desky a fólie PET-G. *Omniplast* [online]. Podolí u Brna: Omniplast, 2013 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.omniplast.cz/531/arla-polyester-petg-desky-a-folie/>
- [22] Polypropylen PP. *Omniplast* [online]. Podolí u Brna: Omniplast, 2013 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.omniplast.cz/category/podle-druhu-materialu/polypropylen-pp/>
- [23] MARTIN, Bella a Bruce HANINGTON. *Universal Methods of Design: 100 Ways to Research Complex Problems, Develop Innovative Ideas and Design Effective Solutions*. 58480. Beverly: Rockport Publishers, 2012, 206 s. ISBN 1592537561.

- [24] TACHI, Tomohiro a Gregory EPPS. Designing One-DOF Mechanisms for Architecture by Rationalizing Curved Folding. *Proceedings of ALGODE 2011* [online]. Tokyo, 2011 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/264886454_Designing_One-DOF_Mechanisms_for_Architecture_by_Rationalizing_Curved_Folding
- [25] KILIAN, Martin, Simon FLÖRY, Zhonggui CHEN, Niloy MITRA, Alla SHEFFER a Helmut POTTMANN. Curved folding. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* [online]. ACM, 2008, **27**(3), 1-9 [cit. 2018-11-13]. DOI: 10.1145/1360612.1360674. Dostupné z: <https://dl-acm-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/citation.cfm?doid=1360612.1360674>
- [26] HUFFMAN. Curvature and Creases: A Primer on Paper. *Computers, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1976, **C-25**(10), 1010-1019 [cit. 2018-11-13]. DOI: 10.1109/TC.1976.1674542. ISSN 0018-9340. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/1674542>
- [27] Kangaroo. *Grasshopper: Algorithmic modeling for Rhino* [online]. Scott Davidson, 2018 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://www.grasshopper3d.com/group/kangaroo>
- [28] EPPS, Gregory. *METHOD FOR BENDING SHEET MATERIAL, BENT SHEET MATERIAL AND SYSTEM FOR BENDING SHEET MATERIAL THROUGH ATTACHMENT DEVICES*. 2008. USA. Uděleno 2010. Zapsáno 2008. Dostupné také z: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20081218&DB=EPODOC&locale=&CC=WO&NR=2008152399A1>
- [29] *Foldtex* [online]. Offenbach am Main: Foldtex-design, c2008-2018 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www.foldtex.com>
- [30] *Alunet: Hliníkové profily na míru* [online]. Pardubice: ALUCAD Bohemia, c2018 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz>
- [31] Informace poskytl Bc. Dominika Kasarová, člen Pneumobil Racing Team Brno. Brno, 10. 2. 2019.
- [32] *ARCUS ENGINEERING spol. s.r.o.* [online]. Brno: ARCUS ENGINEERING, 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.avdel.eu>

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	První pneumobily vytvořené studenty VUT [3].....	14
obr. 2-2	Schéma vnitřního uspořádání pneumobilu Javelin	15
obr. 2-3	Výroba karoserie pneumobilu Airrari [8].....	17
obr. 2-4	Možné uspořádání připojovacích zařízení při ohýbání podle křivky ve tvaru S. [28]	18
obr. 2-5	Ohýbání hliníkového plechu pomocí průmyslových robotů [14]	19
obr. 2-6	Vliv různých tvarů rýh na ohybovou linii [19]	19
obr. 2-7	Možné složení kompozitního materiálu [24]	21
obr. 2-8	Materiál Foldtex [29]	21
obr. 2-9	David Huffman [4]	22
obr. 2-10	Poul Christiansen: Lampa Le Klint 172 [11]	23
obr. 2-11	Vlevo: Flux Chair od Flux furniture. Vpravo: Folding Boat od Maxe Frommelda a Arna Mathiese. [25].....	23
obr. 2-12	Gregory Epps: Design automobilu [25].....	24
obr. 2-13	Kyungeun Ko: Bentley Tailor Made [12]	24
obr. 2-14	Jan P. Rosenthal: Lexus LF-Zero [13]	25
obr. 2-15	Pneumobil Airrari [8]	26
obr. 2-16	Pneumobil DE-PuffAIR [10]	27
obr. 2-17	Pneumobil Javelin [3]	27
obr. 2-18	Pneumobil Gyalogkakukk [9]	28
obr. 2-19	Proces ohýbání různých ohybových vzorů. [5]	29
obr. 2-20	Fotografie vlevo ukazuje ohybovou křivku na rozvinutém papíru. Na fotografii uprostřed je zachycen základní tvar vytvořený přehnutím podél ohybové křivky. Fotografie vpravo zachycuje pokroucenou verzi základního tvaru vzniklou fyzickou interakcí s papírovým modelem [5].....	30
obr. 2-21	Vliv površek na zkroucení výsledné geometrie. Vlevo: Nezkroucený ohyb s rovnoběžnými površkami. Prostřední a vpravo: Zkroucené ohyby s excentricky uspořádanými površkami. [24]	30

obr. 2-22	Model automobilu a jeho rozvinutí (vpravo nahoře). Rozdělení na jednotlivé části přímkových ploch: roviny jsou označeny žlutě, válcové plochy zeleně, kuželové červeně a tangentsní plochy modře. [25]	31
obr. 2-23	Metoda reflexe [15]	32
obr. 2-24	Vztah křivosti a ohybového úhlu [24]	33
obr. 2-25	Simulace ohýbání modelu automobilu [15]	33
obr. 2-26	Příklad upraveného ohybového vzoru a jeho ohýbu pomocí nástroje Freeform Origami [15]	35
obr. 2-27	Modelování rozvinutelné plochy pomocí softwaru KingKong	35
obr. 2-28	Vytvoření simulace zakřiveného ohýbání pomocí pluginu Kangaroo [5] ...	36
obr. 2-29	Příklady gadgetů podle Huffmana [4]	37
obr. 4-1	Papírové modely	42
obr. 4-2	Fotografie papírového modelu prvního variantního řešení	44
obr. 4-3	Skica prvního variantního řešení	44
obr. 4-4	Ohybový vzor pro první variantu: okraje – zeleně, hory – červeně, údolí – modře. 44	
obr. 4-5	Fotografie papírového modelu druhého variantního řešení	45
obr. 4-6	Skica druhého variantního řešení	46
obr. 4-7	Ohybový vzor pro druhou variantu: okraje – zeleně, hory – červeně, údolí – modře. 46	
obr. 4-8	Skica třetího variantního řešení	47
obr. 5-1	Rám pneumobilu Javelin	48
obr. 5-2	Finální tvarové řešení	49
obr. 5-3	Kompoziční skici	50
obr. 5-4	Tvarová analýza použité CCF geometrie	51
obr. 5-5	Detail přední části karoserie	52
obr. 5-6	Detail kokpitu	52
obr. 5-7	Detail blatníku	53
obr. 5-8	Hlavová opěrka	53
obr. 6-1	Třídění vstupní geometrie - 1. část	54
obr. 6-2	Třídění vstupní geometrie - 2. část	55

obr. 6-3	Simulace zakřiveného ohýbání - 1. část.....	56
obr. 6-4	Simulace zakřiveného ohýbání - 2. část.....	57
obr. 6-5	Simulace zakřiveného ohýbání - 2. část.....	57
obr. 6-6	Simulovaný model karoserie	58
obr. 6-7	Ohybové vzory jednotlivých dílů.....	58
obr. 6-8	Varianty narušení ohybové linie	59
obr. 6-9	Porovnání výsledků ohýbání podél křivky narušené	59
obr. 6-10	Finální ohybové vzory s navrženým pořadím ohýbání	61
obr. 6-11	Servisní přístup	63
obr. 6-12	Princip čtvrtotočkové rychloupínky [32]	63
obr. 6-13	Uvažované rozmístění spojovacích prvků	64
obr. 6-14	Rozměrové řešení vozidla	65
obr. 6-15	Výhled z vozidla	66
obr. 6-16	Nástup do vozidla.....	66
obr. 7-1	Základní barevné řešení.....	67
obr. 7-2	Barevné řešení v barvách Pneumobil Racing Team Brno	68
obr. 7-3	Barevné řešení v barvách VUT	68
obr. 7-4	Grafické řešení návrhu	69

12 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1	Vlastnosti vybraných hliníkových slitin [30]	20
tab. 8-1	Srovnání navrženého řešení se současnými monoposty Pneumobil Racing Teamu Brno [31]	71

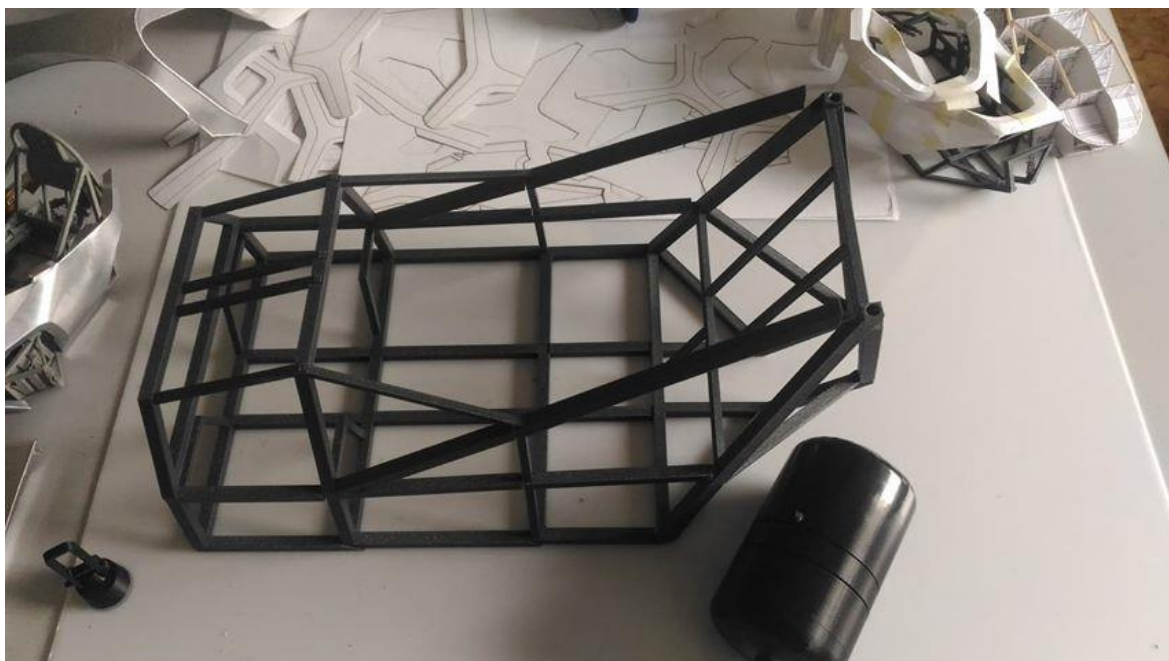
13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

CAD	computer aided design – počítačem podporované projektování
CCF	curved crease folding – zakřivené ohýbání
CNC	computer numeric control – číslicové řízení
PET	polyethylenetereftalát
NURBS	non-uniform rational basis spline
PQ	polyquadrilateral
2D	dvou dimenzionální – rovina
3D	tří dimenzionální – prostor

14 SEZNAM PŘÍLOH

fotografie modelu (A4)
prezentační poster (A1)
ergonomický poster (A1)
technický poster (A1)
designérský poster (A1)
fyzický model M1:4

FOTOGRAFIE MODELU





Konceptní model M1:10